



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**OPTIMALIZACE PARAMETRŮ SLM PROCESU PŘI
ZPRACOVÁNÍ HLINÍKOVÉ SLITINY AW2618**

SLM PROCESS PARAMETERS OPTIMIZATION FOR PROCESSING OF AW2618 ALUMINUM ALLOY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Těšický

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Lukáš Těšický
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace parametrů SLM procesu při zpracování hliníkové slitiny AW2618

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Aditivní technologie výroby kovových materiálů se v posledních 10 letech výrazně rozšiřují do řady průmyslových odvětví, avšak jejich širší aplikace je stále omezena portfoliem dostupných a ověřených materiálů. Technologie Selective Laser Melting patří mezi nejrozšířenější, avšak i pro tuto technologii je v současné době ověřeno jen přibližně 25 materiálů. Rozšíření portfolia zpracovatelných materiálů umožní kvalifikaci SLM procesu pro další průmyslově zpracovávané komponenty.

Typ práce: výzkumná
Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny EN AW2618 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení,
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů,
- experimentálně popsat vlivy jednotlivých parametrů a strategií.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

KARG, M, AHUJA, B, SCHMIDT, M. Processability of high strength Aluminium-Copper alloys AW-2022 and 2024 by Laser Beam Melting in Powder Bed. Solid Freeform Fabrication Symposium. 2014, s. 420–436.

ZHANG, H, ZHU, H, QI, T, HU, Z, ZENG, X. Selective laser melting of high strength Al–Cu–Mg alloys: Processing, microstructure and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A [online]. 2016, roč. 656, s. 47–54. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2015.12.101

AHUJA, B, KARG, M, NAGULIN, K, SCHMIDT, M. Fabrication and Characterization of High Strength Al-Cu Alloys Processed Using Laser Beam Melting in Metal Powder Bed. Physics Procedia [online]. 2014, roč. 56, s. 135–146. ISSN 4991318564. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2014.08.156

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 za pomoci technologie Selective laser melting (SLM). Teoretická část obsahuje základní poznatky o výrobě touto technologií a možnosti vyhodnocení relativní hustoty vzorků. Dále obsahuje přehled současného stavu poznání o zpracování hliníkových slitin technologií SLM. Především pak hliníkových slitin skupiny 2000, kde je hlavním legujícím prvkem měď. V experimentální části byly na základě rešerše navrženy experimentální tělesa, která je možné rozdělit do tří oblastí: návarové vzorky, objemové vzorky a vzorky pro zjištění mechanických vlastností. Návarové a objemové vzorky sloužily k nalezení vhodných procesních parametrů pro dosažení relativní hustoty blízké plnému objemu materiálu. Za tímto účelem byl prozkoumán vliv různých skenovacích strategií na výslednou relativní hustotu vzorku. Limitujícím faktorem se ukázal výskyt drobných trhlin v celé šíři zkoumaných parametrů. Při porovnání mechanických vlastností vzorků vyrobených technologií SLM s referenčním tvářeným materiálem bylo zjištěno, že materiál zpracovaný pomocí SLM dosahuje pouze polovičních hodnot meze kluzu a pevnosti. To je způsobeno především výskytem drobných trhlin a dalších defektů ve struktuře materiálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Selective laser melting, EN AW 2618, optimalizace parametrů, skenovací strategie, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

The diploma thesis deals with possibilities for processing aluminium alloy EN AW 2618 using Selective laser melting (SLM). The theoretical part contains basic knowledge about production by this technology and possibilities of evaluation of relative density of samples. It also contains an overview of the current state of knowledge about the processing of aluminium alloys by SLM technology. Above all, aluminium alloys of the series 2000, where the main alloying element is copper. In the experimental part testing samples were designed based on the research. These samples can be divided into three areas: single-track specimens, volume samples and samples for tensile testing. Single-track and volume samples were used to find appropriate processing parameters to achieve a relative density close to full volume of material. For this purpose, the effect of the different scanning strategies on the relative density of the sample were examined. The limiting factor has been the occurrence of small cracks in the broad range of parameters studied. Mechanical properties of samples produced by SLM were compared with extruded material. It was found that the material processed by SLM achieves only half the yield strength and tensile strength of extruded material. This is mainly due to the occurrence of small cracks and other defects in the structure of the material.

KEYWORDS

Selective laser melting, EN AW 2618, parameters optimization, scanning strategies, mechanical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TĚŠICKÝ, L. *Optimalizace parametrů SLM procesu při zpracování hliníkové slitiny AW2618*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 108 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D..

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu „*Vývoj pokročilých materiálů s využitím metody laserového spékání*“, který je realizován za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím Grantové agentury České republiky.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval především panu doc. Ing. Danielu Koutnému, Ph.D. za vedení diplomové práce, odborné rady a cenné připomínky. Další dík patří doc. Ing. Davidu Palouškovi, Ph.D. za odborné konzultace. Chtěl bych poděkovat také kolektivu z Ústavu materiálových věd a inženýrství za pomoc s přípravou metalografických vzorků. V neposlední řadě také Filipu Rušarovi za pomoc s přípravou experimentů. Závěrem bych chtěl poděkovat rodině a snoubence za jejich podporu v průběhu celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci *Optimalizace parametrů SLM procesu při zpracování hliníkové slitiny AW2618* jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D.. Současně prohlašuji, že jsem v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje

V Brně dne 19. 5. 2017

.....
Bc. Lukáš Těšický

OBSAH

1	Úvod	13
2	Přehled současného stavu poznání	14
2.1	Selective laser melting (SLM)	14
2.1.1	Popis zařízení	14
2.1.2	Procesní parametry	15
2.1.3	Relativní hustota	16
2.1.4	Měření porozity	17
2.1.5	Skenovací strategie	18
2.2	Hliníková slitina EN AW 2618	18
	Svařitelnost	19
2.3	Zpracování hliníkových slitin technologií SLM	19
2.3.1	Procesní parametry slitin třídy 2000	19
2.3.2	Procesní parametry slitiny 2618	21
3	Analýza problému a cíl práce	23
3.1	Zhodnocení poznatků současného stavu poznání	23
3.2	Cíle práce	23
4	Materiál a metody	24
4.1	SLM výrobní zařízení	24
4.2	Práškový materiál	26
4.3	Experimenty	26
4.3.1	Příprava staveb („Pre-processing“)	27
4.3.2	Návary	27
4.3.3	Objemové vzorky	29
4.3.4	Vyhodnocení experimentů	31
5	Výsledky	33
5.1	Testy práškového materiálu	33
5.1.1	Morfologie částic	33
5.1.2	Analýza chemického složení	33
5.1.3	Analýza distribuce velikosti částic	34
5.2	Návary	36
5.2.1	Test ručního nanášení	36
5.2.2	1. sada návarů	38
5.2.3	2. sada návarů	41
5.2.4	Vyhodnocení velikosti návarů	43
5.3	Objemové vzorky	46
5.3.1	Experiment s velikostí vzorků	46
5.3.2	„Chessboard“ strategie	47
5.3.3	Strategie „Hull and Core“	51
5.3.4	Strategie „Pre-sintering“	56
5.3.5	Vzorky na podpurné struktře	57
5.3.6	Experiment za zvýšené teploty	63
5.4	Testy mechanických vlastností	69
5.4.1	Referenční materiál	69
5.4.2	Válcový polotovar	70
5.4.3	Kvádrový polotovar	74
5.4.4	Mikrostruktura a fraktografie	78

6	Diskuze	81
6.1	Analýza práškového materiálu	81
6.2	Návarové experimenty	81
6.3	Skenovací a procesní strategie	81
6.3.1	„Meander“	81
6.3.2	„Chessboard“	81
6.3.3	„Hull and Core“	82
6.3.4	„Remelting“	82
6.3.5	„Pre-sintering“	82
6.3.6	Vzorky na podpůrné struktuře	82
6.3.7	Zvýšený výhřev platformy	83
6.4	Principy vzniku vad v materiálu	83
6.4.1	Oxidační vrstva	83
6.4.2	Nerovnoměrnost vrstvy	84
6.4.3	Solidifikační trhliny	85
7	Závěr	86
8	Seznam použitých zdrojů	87
9	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	90
10	Seznam obrázků a grafů	91
11	Seznam tabulek	94
12	Seznam příloh	95
13	Přílohy	96

1 ÚVOD

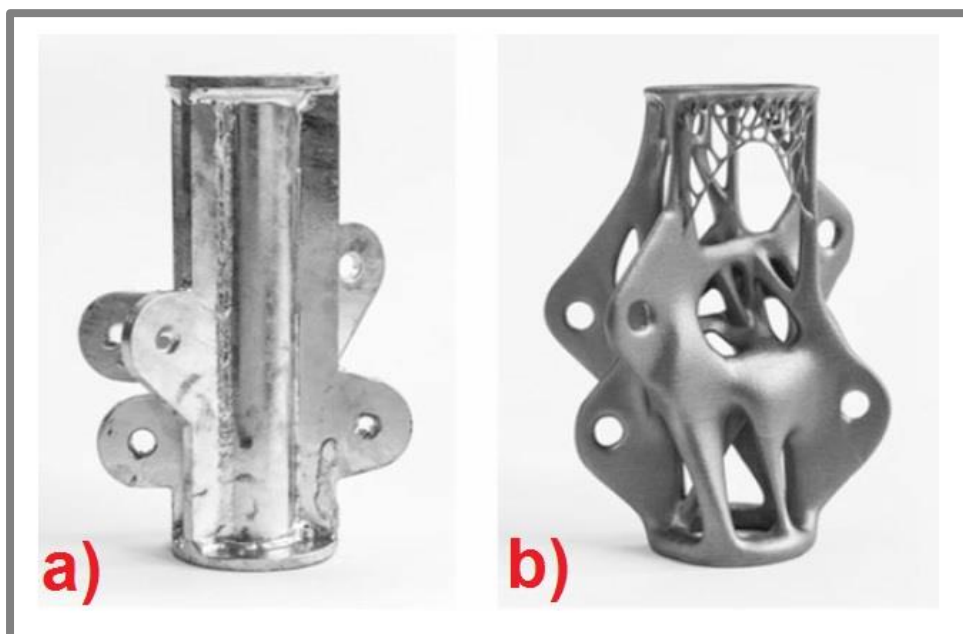
1

Technologie Selective laser melting (SLM) je progresivní metoda aditivní výroby, která funguje na principu spékání jednotlivých vrstev kovového prášku za pomoci laseru. Díky tomu jsme schopni vyrábět trojrozměrné kovové díly přímo z digitálních dat. To našlo uplatnění při výrobě jak funkčních prototypů, tak součástek určených pro speciální aplikace (např. odlehčené díly pro letecký, automobilový i kosmický průmysl).

Množství typů materiálů používaných pro SLM výrobu je omezené, avšak neustále se zvětšuje. Dnes jsou již běžně používané nerezové a nástrojové oceli a slitiny titanu a hliníku. Dále se však používají slitiny mědi, ale i vzácné kovy např. zlato.

Tato práce bude zaměřena na zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618. Díky její schopnosti zachovávat si své mechanické vlastnosti až do teploty 300 °C je často používána na výrobu součástek, jako jsou motorové písty a části turbodmychadel. Nevýhodou je, že je obtížně svařitelná.

Práce se bude zabývat nalezením vhodných procesních parametrů pro zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 pomocí technologie SLM. Budou realizovány prvotní experimenty jednotlivých návarů pro zjištění základního chování materiálu. Následně budou optimalizovány parametry pro výrobu objemových vzorků s ohledem na minimální porozitu a maximální mechanické vlastnosti.



Obr. 1-1 a) Díl vyroben konvenčními metodami b) Díl vyroben pomocí SLM [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Selective laser melting (SLM)

Technologie Selective laser melting (SLM) je progresivní metoda aditivní výroby, která funguje na principu spékání jednotlivých vrstev kovového prášku za pomoci laseru. Díky tomu jsme schopni vyrábět trojrozměrné kovové díly přímo z digitálních dat. Tyto součásti mohou mít tvarovou volnost, která je pomocí konvenčních metod výroby téměř nevyrobitelná.

2.1.1 Popis zařízení

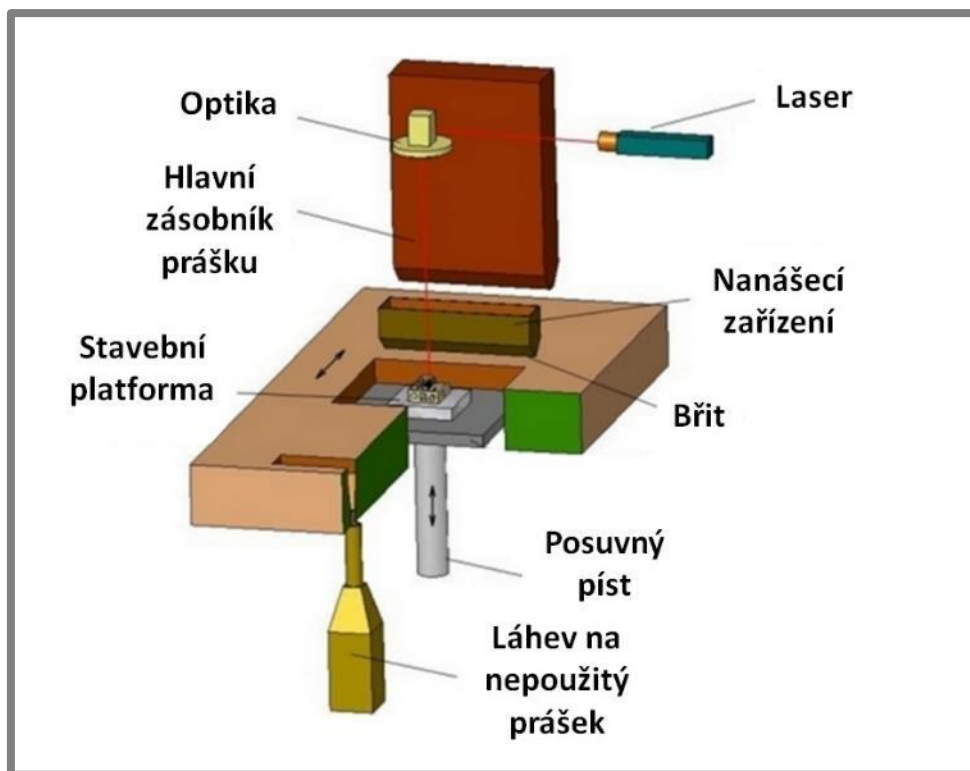
Pro výrobu vzorků v této práci bude použito zařízení SLM 280 HL od firmy SLM Solutions GmbH [2]. Disponuje ytterbiovým laserem o maximálním výkonu 400W a komorou určenou pro stavbu, která má rozměry (280x280x350) mm.

Postup výroby

Výrobní proces je následující:

- „Recoater“ (nanášecí zařízení) nadávkuje a pomocí břitu nanese jednotnou vrstvu prášku.
- Laserový paprsek, směřován natáčením galvanometrických zrcadel, vypálí danou vrstvu určenou z 3D dat modelu.
- Píst stavební platformy se posune dolů o hodnotu tloušťky jedné vrstvy.

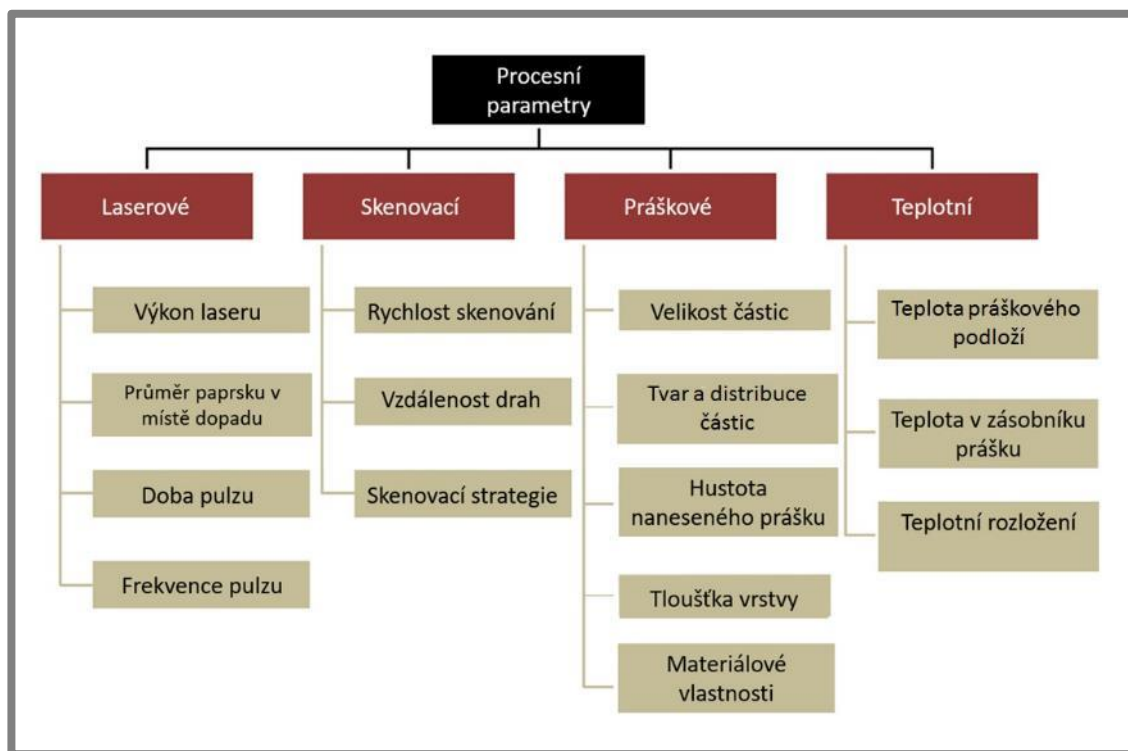
Tento proces je opakován, dokud nedojde k vytvoření všech vrstev, jež tvoří kompletní díl.



Obr. 2-1 Schématické znázornění principu SLM [4]

2.1.2 Procesní parametry

Kvalita výroby pomocí technologie SLM je ovlivněna velkým množstvím procesních parametrů. *Aboulkhair et al.* [3] rozděluje procesní parametry do 4 skupin, jak je znázorněno na Obr. 2-2. Při optimalizaci kvality výroby lze jednoduše nastavovat parametry spojené s laserem a skenovací strategií. Parametry spojené s teplotou lze v zařízení SLM 280 HL nastavit jen částečně a parametry prášku nelze vzhledem k povaze práce měnit vůbec.



Obr. 2-2 Tabulka procesních parametrů [3] (upraveno)

Objemová hustota energie

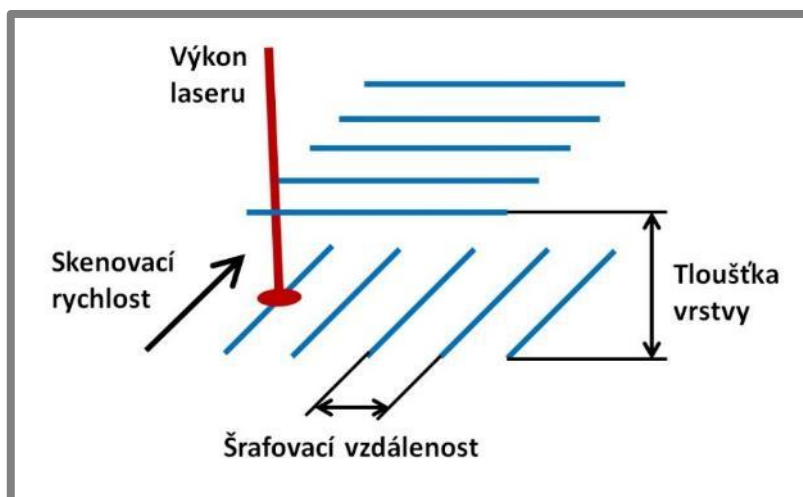
Parametry nastavení laseru a skenovací strategie lze vyjádřit pomocí hodnoty objemové hustoty energie, označované jako Ψ [J/mm^3]. Dle [9] se určí ze vztahu:

$$\Psi = \frac{L_p}{L_s \cdot L_t \cdot H_d} \quad (1)$$

Kde:

L_p [W]	výkon laseru
L_s [$mm \cdot s^{-1}$]	skenovací rychlost
L_t [μm]	tloušťka vrstvy
H_d [μm]	šrafovací vzdálenost (vzdálenost mezi jednotlivými dráhami laseru)

Objemová hustota energie tedy vyjadřuje množství energie dopadající na jednotku objemu. Obdobně lze vyjádřit plošnou či lineární hustotu energie. Na Obr. 2-3 se nachází přehled parametrů popsanych v rovnici (1).



Obr. 2-3 Přehled procesních parametrů

2.1.3 Relativní hustota

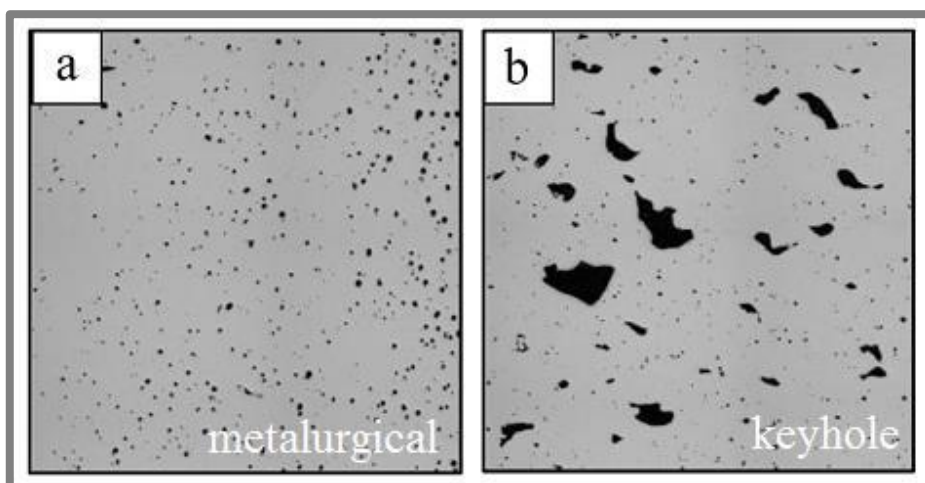
Pro vyhodnocení kvality vytvořených objemových vzorků se stanovuje relativní hustota. Ta je určena poměrem hustoty vzorku a plného materiálu a vyjadřuje se v procentech. Při dosažení relativní hustoty blízké 100% se dá přepokládat maximální mechanické vlastnosti vzorku. Opakem relativní hustoty je porozita. Ta vyjadřuje procentuální zastoupení pórů v objemu vzorku.

Druhy pórů

Aboukhair [3] rozděluje póry podle jejich vzniku a tvaru na dva druhy, metalurgické a „Keyhole“.

Metalurgické póry (Obr. 2-4a), také označované jako vodíková porozita, jsou malé sférické póry do velikosti 100 μm . Vznikají při nižších skenovacích rychlostech, kdy jsou bublinky plynu uvězněny v tavicí lázni.

„Keyhole“ póry (Obr. 2-4b) mají nepravidelný tvar a velikost větší než 100 μm . Vznikají při vyšších skenovacích rychlostech a jsou způsobeny rychlým tuhnutím kovu, kdy nedojde k úplnému vyplnění mezer roztaveným materiálem.



Obr. 2-4 a) Metalurgické póry b) „Keyhole“ póry [3]

2.1.4 Měření porozity

2.1.4

Existuje několik metod pro zjištění porozity objemových vzorků. V této práci budou používány dvě metody, kde každá má své klady i zápory.

Výpočetní tomografie

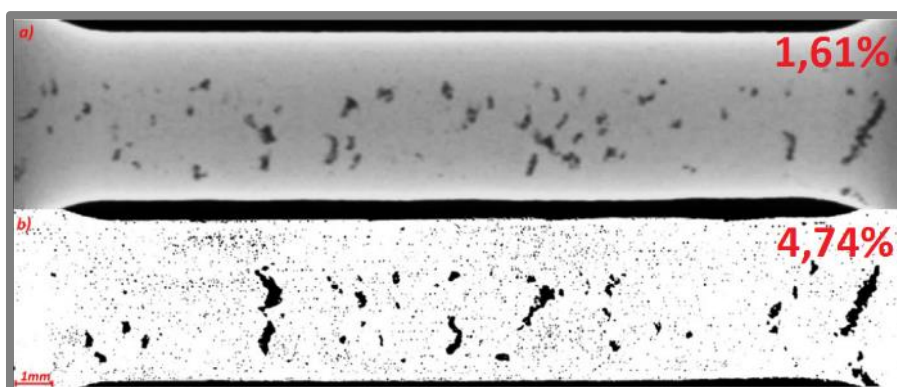
Výpočetní tomografie (CT) je nedestruktivní metoda, pomocí které získáme 3D model zkoumaného objektu. Funguje na principu prozařování objektu rentgenovým svazkem z různých směrů. Následným sesazením obrazů vznikne 3D vizualizace objektu.

Metalografický výbrus

U druhé metody je porozita vyhodnocena na základě snímku výbrusu, jedná se tedy o destruktivní metodu. Je proveden výbrus vzorku, který je poté vyfotografován fotografickým mikroskopem. Získaný snímek je následně vyhodnocen pomocí softwaru pro analýzu obrazu.

Porovnání metod

Porovnáním výsledků těchto dvou metod se zabýval *Ziółkowski*. [4]. U testovaných vzorků, jež měly velký obsah metalurgických pórů, se výsledky lišily až dvojnásobně (Obr. 2-5). Jak je vidět i z obrázku, tak tento rozdíl je způsoben limitací CT. Rozpoznávací rozlišení jednoho voxelu bylo 37 μm . CT tedy není schopno detekovat většinu metalurgických pórů.

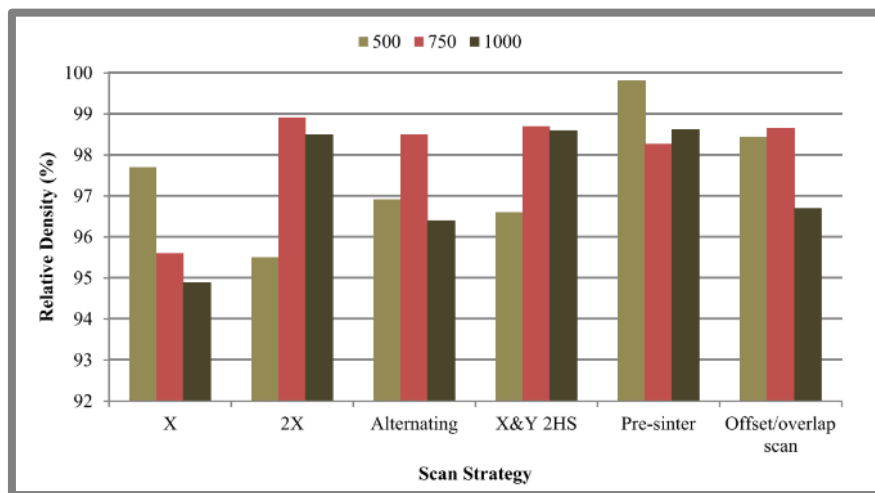


Obr. 2-5 a) Snímek z CT b) Snímek výbrusu [4]

Naopak měření pomocí výbrusu může do výsledku zanést určitou chybu podle výběru místa řezu. Zato při měření pomocí CT je provedeno měření v celém objemu vzorku. Pro zpřesnění měření by bylo potřeba provést větší množství řezů, což je časově i finančně náročnější.

2.1.5 Skenovací strategie

Aboulkhair [3] také zkoumal, jak změna skenovací strategie ovlivňuje výslednou porozitu vzorků. Pojmem skenovací strategie označujeme postup, jakým laser navaří průřez jednotlivých vrstev tisku. Vzorky byly vyrobeny z materiálu AlSi10Mg s konstantní hodnotou výkonu laseru 100 W. Pro každou skenovací strategii byly vyrobeny tři vzorky se skenovací rychlostí 500, 750 a 1000 mm/s. Výsledky jsou vidět v grafu (Obr. 2-6). Nejlepších výsledků (v průměru 98,9 %) dosahovala strategie „Pre-sintering“. Ta spočívá v tom, že každá vrstva je skenována dvakrát. Nejprve s polovičním výkonem a poté s plným. Naopak nejhoršího výsledku (v průměru 96 %) dosahovala základní skenovací strategie označená jako X, kde je průřez skenován v jednom směru a bez opakování. Změna skenovací strategie může tedy zásadně ovlivnit výslednou kvalitu vyrobené součásti.



Obr. 2-6 Závislost relativní hustoty na skenovací strategii a rychlosti [3]

dosahovala základní skenovací strategie označená jako X, kde je průřez skenován v jednom směru a bez opakování. Změna skenovací strategie může tedy zásadně ovlivnit výslednou kvalitu vyrobené součásti.

2.2 Hliníková slitina EN AW 2618

Podle normy ČSN EN 573-1 [14] patří hliníková slitina EN AW 2618 do skupiny 2000. Takto jsou označeny hliníkové slitiny, kde je hlavním legujícím prvkem měď. Přehled jejího chemického složení se nachází v Tab. 2-1.

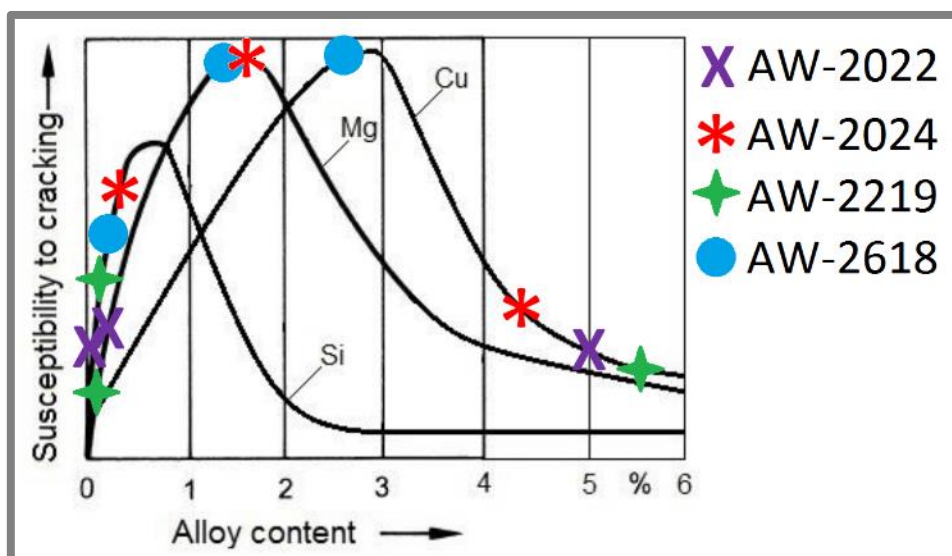
Tab. 2-1 Chemické složení slitin EN AW 2618

Hm. %	Cu	Fe	Mg	Ni	Si	Ti
EN AW-2618	1,8-2,7	0,9-1,4	1,2-1,8	0,8-1,4	0,15-0,25	0,2

Tato hliníková slitina je určena ke tváření. Vyznačuje se vysokou pevností, dobrou obrobitelností a také zvýšenou odolností vůči atmosférické korozi. Díky vysokému poměru pevnosti ke vlastní hmotnosti a schopnosti zachovávat si své mechanické vlastnosti až do teploty 300 °C se používá především v automobilovém a leteckém průmyslu na výrobu pístů, části turbodmychadel a rotačních součástí leteckých motorů. Patří mezi precipitačně vytvrditelné slitiny. Nevýhodou je její obtížná svařitelnost. [21]

Svařitelnost

Podle [5] je citlivost hliníkových slitin na vznik solidifikačních trhlin (horké praskání) při svařování závislá na obsahu legujících prvků. Jak je vidět na grafu níže (Obr. 2-7). V grafu je vyznačeno chemické složení několika hliníkových slitin třídy 2000. Slitina 2618 je díky svému chemickému složení velice náchylná na vznik solidifikačních trhlin.



Obr. 2-7 Závislost pravděpodobnosti výskytu prasklin na obsahu legujících prvků při svařování [5] (upraveno)

Horké trhliny jsou mikrotrhliny, které vznikají při svařování ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti. Příčinou jejich vzniku jsou tahová napětí, která vznikají z důvodu velkého rozdílu mezi teplotou likvidu a solidu. Tyto trhliny mohou nepříznivě ovlivnit mechanické vlastnosti materiálu.

Nízká porozita tedy nemusí vždy znamenat dobré mechanické vlastnosti, jelikož tyto trhliny nemusí být při měření porozity odhaleny.

2.3 Zpracování hliníkových slitin technologií SLM

2.3

2.3.1 Procesní parametry slitin třídy 2000

2.3.1

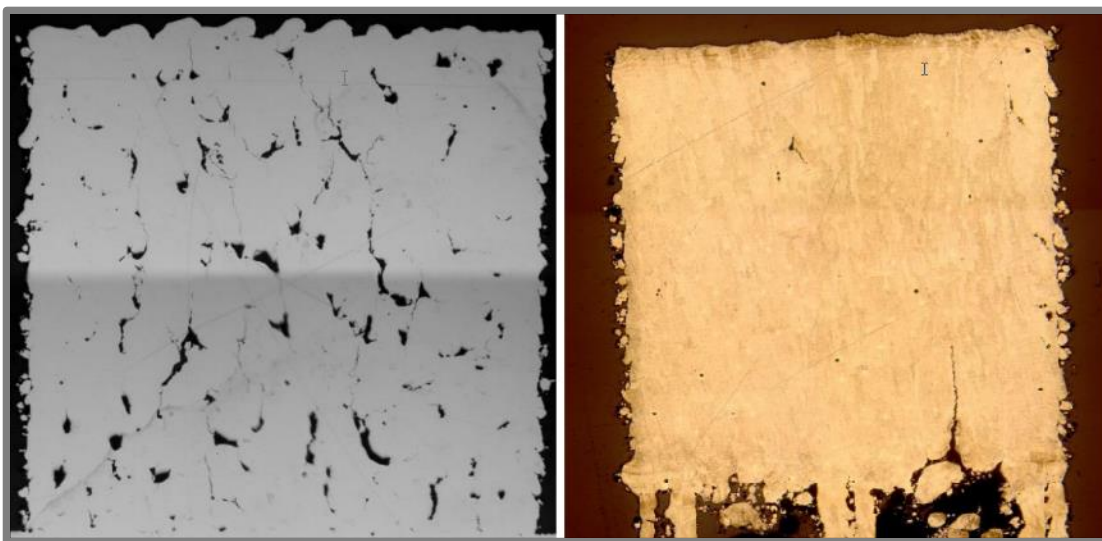
Bylo publikováno několik článků zabývajících se možnostmi zpracování hliníkových slitin třídy 2000 za pomoci technologie SLM.

Karg [6] zjišťoval možnost zpracování slitin AW-2022 a AW-2024. Pro zpracování bylo použito zařízení SLM 50, jenž disponuje 100W ytterbiovým laserem.

Nejprve byly provedeny návarové testy. Výsledky však nebyly prezentovány, jelikož nebyly konzistentní a nepodařilo se je reprodukovat. Autoři článku to dávají za vinu flexibilnímu břítu na nanášecím zařízení, který nedokáže nanést rovnoměrnou první vrstvu.

Jako objemové vzorky použili krychle o délce hrany 5 mm. Vzorky se stejnými parametry byly stavěny bez a poté na podporách. Vzorky na podporách dosahovaly obecně vyšších hodnot relativní hustoty (Obr. 2-8). Autoři to vysvětlují tak,

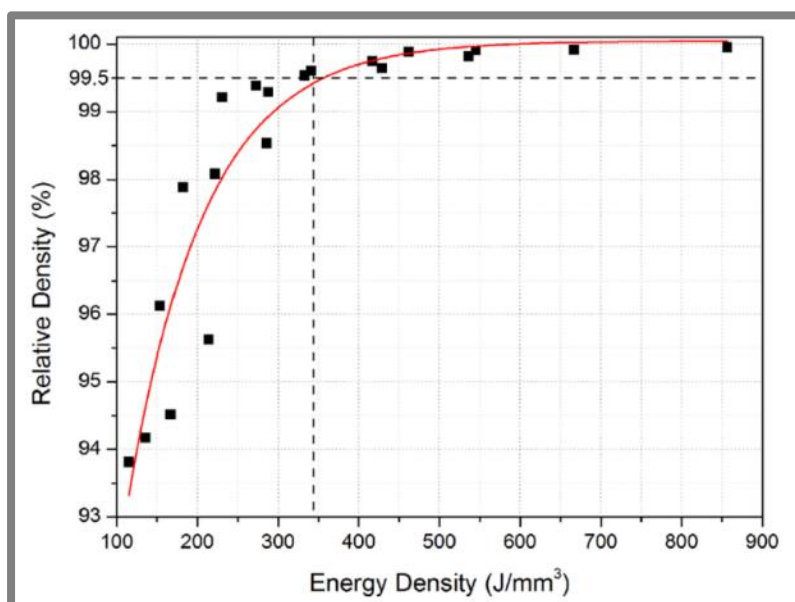
že u vzorků na podporách je redukován odvod tepla. Nejlepší vzorky dosahovaly relativní hustoty až 99,9 %. Pro tyto vzorky byly použity parametry výkonu 100 W, skenovací rychlosti 195 až 245 mm/s, a šrafovací vzdálenost 70 μm .



Obr. 2-8 Vlevo – vzorek vyrobený bez podpor, Vpravo – vzorek vyrobený na podporách [6]

Zpracováním slitiny AW-2024 se zabýval i *Zhang* [7], ke zpracování bylo použito zařízení vlastní výroby (LSNF-I) s 200W ytterbiovým laserem. Nejprve byly postaveny krychlové vzorky s délkou hrany 10 mm, pro nalezení optimálních procesních parametrů.

Z grafu (Obr. 2-9) lze vidět, že byla nalezena korelace mezi objemovou hustotou energie a výslednou relativní hustotou vzorku. Nad hodnotou hustoty energie 340 J/mm^3 dosahovaly vzorky relativní hustoty vyšší než 99,5 %.



Obr. 2-9 Graf závislosti relativní hustoty na objemové hustotě energie [7]

Následně byly vyrobeny vzorky pro zkoušky mechanických vlastností. Byla provedena tahová zkouška a zkouška tvrdosti. Výsledky jsou vidět v tabulce (Obr. 2-10). Vzorek vyroben pomocí SLM dosahuje až dvojnásobné hodnoty meze pevnosti a meze kluzu než vzorek litého materiálu. Dosáhl ale poloviční hodnoty tažnosti. Tvrdost narostla až o 30 HV. Pokud by byl vzorek SLM precipitačně vytvrzen tepelnou úpravou T6 mohl by dosáhnout ještě lepších výsledků.

Sample	State	UTS(MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	EL(%)	HV
SLM	As-fabricated	402.4 ± 9.5	276.2 ± 41	6 ± 1.4	111
AA 2024-O	As-cast	185	75	12	80
AA 2024-T6	Wrought	476	393	10	135–145

Obr. 2-10 Výsledky zkoušek mechanických vlastností [7]

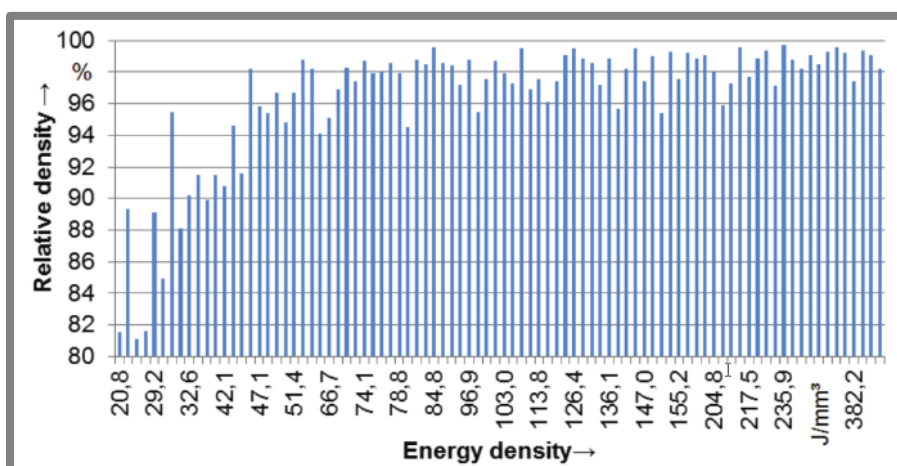
2.3.2 Procesní parametry slitiny 2618

2.3.2

Ahuja [8], zkoumal možnosti zpracování slitin AW 2219 a AW 2618. Bylo použito zařízení SLM 50 stejné jako použil Karg [6]. Také postup testů byl stejný. Od návarů, přes stěnové vzorky až k objemovým vzorkům.

Na návarových testech bylo otestováno široké spektrum parametrů výkonu laseru a skenovací rychlosti. Parametry, u kterých byl návar vizuálně v pořádku, byly použity pro stavbu stěnových vzorků. Podle šířek stěn byl pro dané parametry výkonu a rychlosti voleny hodnoty šrafovací vzdálenosti.

Objemové vzorky byly opět provedeny bez a na podporách. Vzorky na podporách dosahovaly vyšších hodnot relativní hustoty. Relativní hustota byla měřena v 5 řezech. Nejvyšší naměřené hodnoty byly pro AW 2219 - 99,94 % a pro AW 2618 – 99,97 %. Ani u jedné slitiny však nebyla nalezena korelace mezi hodnotou objemové hustoty energie a relativní hustotou vzorku (Obr. 2-11).

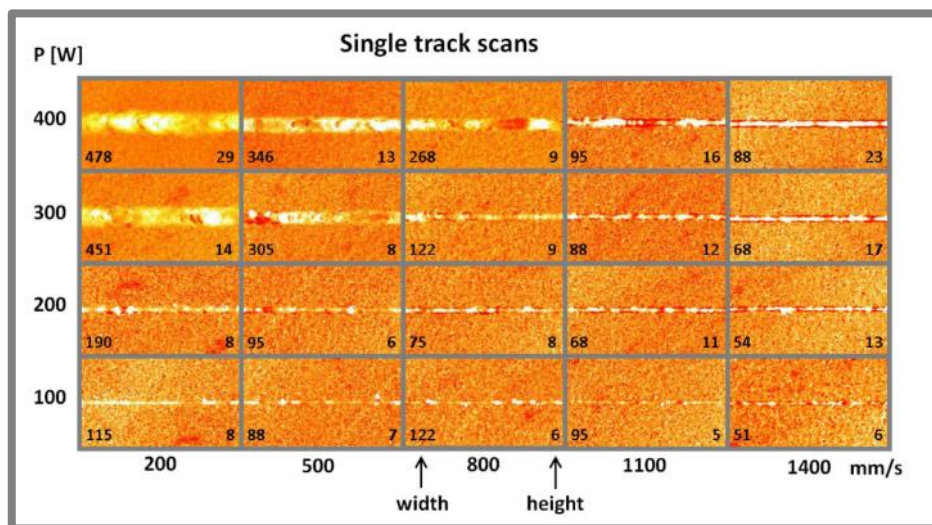


Obr. 2-11 AW 2618 – závislost relativní hustoty na objemové hustotě energie [8]

Zpracováním slitiny AW 2618 se v rámci projektu GAČR zabývá i náš ústav. Doposud byly na toto téma vydány dva články, Koutný [9] a Koukal [10].

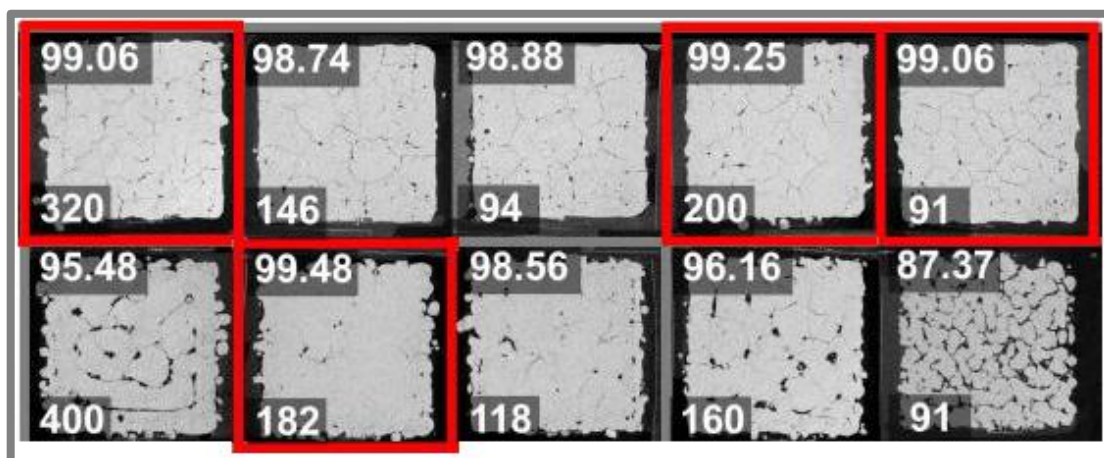
Výroba vzorků probíhala na zařízení SLM 280 HL popsaném výše. Postup experimentů šel od návarů až k objemovým vzorkům na podporách.

Nejlepších výsledků dosáhly návary s výkonem laseru 300 W a 400 W a skenovací rychlostí 1400 mm/s (Obr. 2-12).



Obr. 2-12 Vyhodnocení single track testů [9]

Objemové vzorky byly krychle o délce hrany 5 mm. Porozita byla vyhodnocena za pomoci CT s rozlišením jednoho voxelu 12 μm . Stejně jako u [8] nebyl nalezen vztah mezi relativní hustotou a objemovou hustotou energie. Vzorky s podobnou hodnotou hustoty energie dosahovaly diametrálně odlišných relativních hustot (Obr. 2-13).



Obr. 2-13 Snímky z CT, Horní hodnota – relativní hustota, Spodní hodnota – hustota energie [10] (upraveno)

Vybrané vzorky byly poté postaveny se stejnými parametry, ale na podporách. Nebylo však prokázáno zlepšení v jejich kvalitě.

Bylo dosaženo maximální relativní hustoty 99,66 %, avšak tento vzorek obsahoval velké množství trhlín. Což je způsobeno nejspíš velkým teplotním gradientem mezi platformou a tavnou lázní. Zařízení SLM 280 HL totiž při použití redukčního rámečku umožňuje přehřev pouze na 80 $^{\circ}\text{C}$.

Pro stavbu objemu se jako vhodné parametry jeví výkon 200 W a skenovací rychlost 200 mm/s, zatímco nejlepšího povrchu bylo docíleno pomocí výkonu 400 W skenovací rychlosti 1400 mm/s.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3

Za posledních 10 let prošla technologie SLM velkým pokrokem v oblasti zpracovatelnosti materiálů. V současné době je touto metodou procesně zvládnuto přibližně 25 materiálů. Prozkoumáním možností zpracování dalších, kvalitnějších materiálů, by rozšířilo schopnost aplikace této technologie v průmyslu. Umožnilo by to výrobu komponentů, které jsou konvenčními metodami jen obtížně vyrobitelné.

Aby bylo možné vyrábět technologií SLM součásti z hliníkové slitiny EN AW 2618 pro průmyslové aplikace, je nutné zaručit opakovatelné dosažení mechanických vlastností při zpracování tohoto materiálu. Z toho důvodu je potřeba znát vztah mezi jednotlivými procesními parametry a mechanickými vlastnostmi materiálu.

3.1 Zhodnocení poznatků současného stavu poznání

3.1

Zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 pomocí technologie SLM je doposud málo prozkoumaná oblast. Objevují se první články, které se snaží nalézt vhodné procesní parametry pro zpracování této vysokopevnostní slitiny. Daří se také vyrobit první vzorky, které dosahují dostatečné kvality pro testování mechanických vlastností.

Hlavním srovnávacím kritériem kvality objemových vzorků je relativní hustota. Tu lze měřit několika způsoby. A to buď pomocí CT, nebo provedením metalografického výbrusu. Obě metody byly v několika článcích srovnány. Autoři dospěli k názoru, že naměřená hodnota porozity může být ovlivněna způsobem měření. Obě metody mají své klady i zápory a je potřeba pečlivě zvážit vhodnou metodu pro danou aplikaci.

Nejlepší objemové vzorky zkoumané slitiny EN AW 2618 docílily hodnot relativní hustoty vyšší než 99,5 %, avšak autoři zmiňují výskyt trhlin ve většině vzorků. Tento fakt přikládají velkému teplotnímu gradientu mezi stavěným vzorkem a platformou. Ve všech článcích byly realizovány objemové vzorky o velikosti 5x5x5 mm. Je tedy nutné ověřit nalezené procesní parametry i pro větší vzorky. U těch lze přepokládat, vzhledem k delší době stavby, vznik většího teplotního gradientu. V důsledku toho se předpokládá i větší výskyt trhlin. Tyto trhliny mohou mít zásadní vliv na výsledné mechanické vlastnosti vyrobených součástí.

Z rešeršní části práce vyplývá, že změna skenovací strategie při zachování ostatních procesních parametrů může mít značný vliv na výslednou porozitu vzorku. Tento vliv však doposud nebyl pro slitinu EN AW 2618 prozkoumán.

3.2 Cíle práce

3.2

Diplomová práce se zabývá studiem vlivu SLM procesních parametrů při výrobě z hliníkové slitiny EN AW 2618

Hlavním cílem je objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout experimentální tělesa, metody testování a vyhodnocení
- navrhnout výrobní strategie a rozsahy ověřovaných parametrů
- experimentálně popsat vlivy jednotlivých parametrů a strategií

4 MATERIÁL A METODY

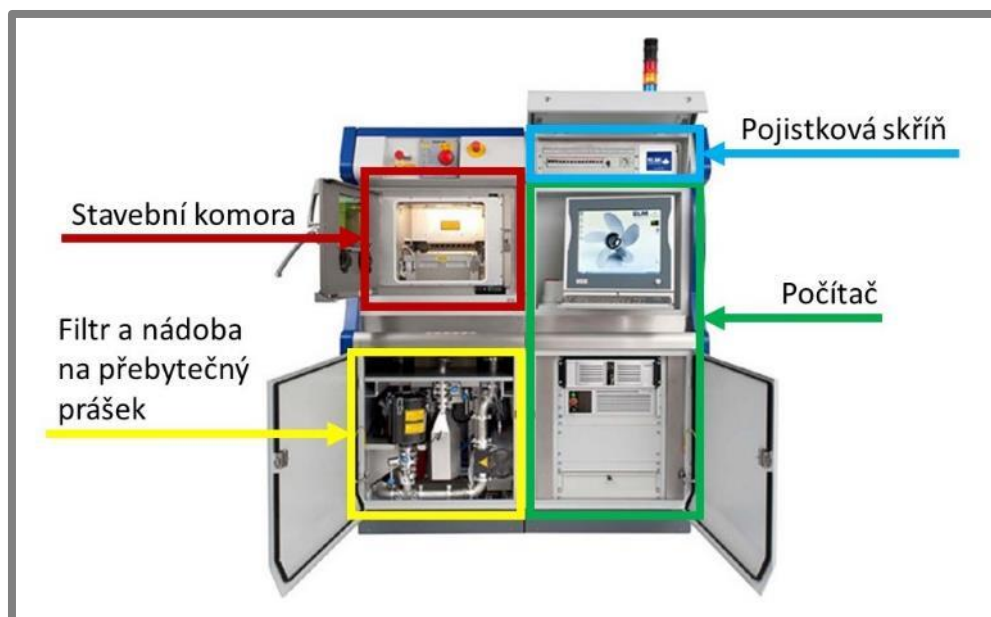
4.1 SLM výrobní zařízení

Pro stavbu všech experimentálních vzorků bylo použito výrobní zařízení SLM 280 HL od německé firmy SLM Solutions GmbH. Jedná se o zařízení pro aditivní výrobu kovových materiálů za pomoci technologie SLM. V současné době se dodává ve třech konfiguracích osazení laseru. Duální optika (1x400W a 1x1000W), (2x400W), anebo jednoduchá (1x400W). Námi používané zařízení je osazeno jedním 400W Ytterbiovým vláknovým laserem. Technické specifikace zařízení uváděné výrobcem můžeme vidět v tab. 4.1

Tab. 4-1 Specifikace zařízení SLM 280 HL

Stavební prostor (DxŠxV)	280 x 280 x 365 mm ³
Rychlost stavby	až 55 cm ³ /h
Tloušťka vrstvy	20 – 75 μm
Průměr zaostřeného paprsku	80 – 115 μm
Maximální skenovací rychlost	10 m/s
Spotřeba inertního plynu (při stavbě)	2,5 l/min (Ar,N ₂)
Spotřeba inertního plynu (při tlakování)	70 l/min (Ar,N ₂)
Kvalita a spotřeba vzduchu	ISO 8573-1:2010, 50 l/min při 6 bar
Elektrický přípojka a příkon	400 V 3NPE, 32 A, 50/60 Hz, 3,5 - 5,5 kW
Hlavní rozměry zařízení (DxŠxV)	3050 mm x 1050 mm x 2850 mm (s PSH100)
Hmotnost zařízení (s/bez prášku)	cca. 1500 kg/ 1300 kg

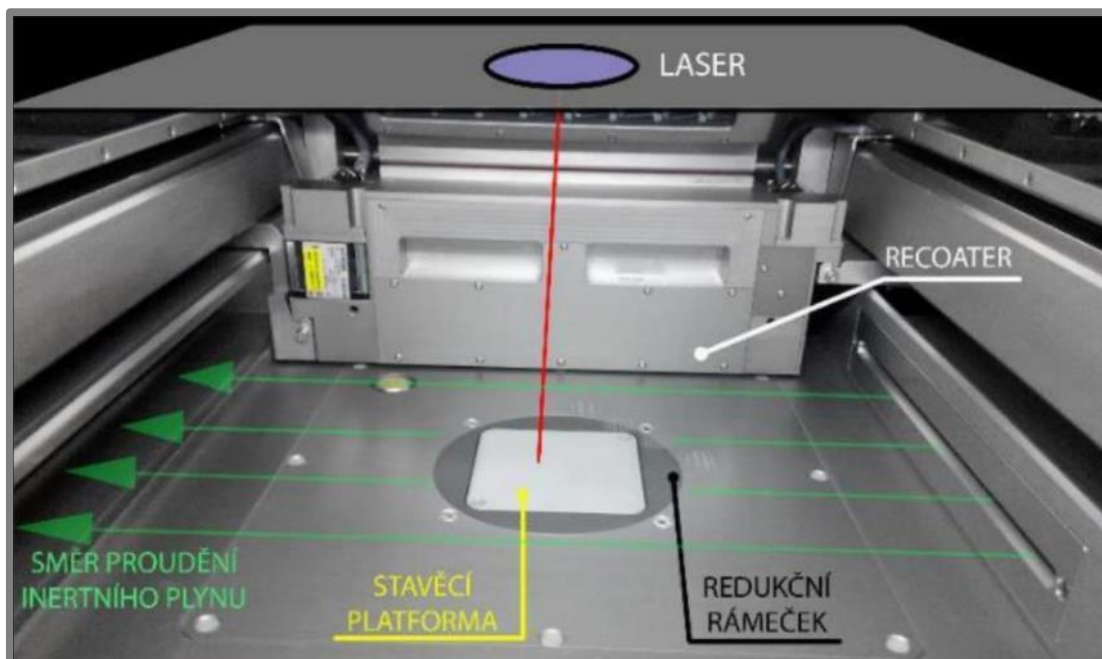
Na Obr. 4-1 můžeme vidět popis základních částí zařízení SLM 280 HL. V levé části se nachází nejdůležitější část zařízení, kterou je stavební komora. Nad komorou se nachází zrcadla pro směrování laserového paprsku a hlavní zásobník prášku („main tank“). Pod stavební komorou jsou umístěny láhve na použitý materiál a filtr na zplodiny z ochranné atmosféry.



Obr. 4-1 Výrobní zařízení SLM 280 HL [11] (upraveno)

V pravé části se nachází ovládací prvky zařízení. Počítač na otočném rameni a nad ním pojistková skříň s dalším ovládacím displejem. V zadní části zařízení je umístěna elektronika.

Pro běh zařízení SLM 280 HL je potřeba kompresor pro výrobu stlačeného vzduchu a generátor dusíkové atmosféry, popřípadě tlaková láhev s argonem. Další příslušenství je také prosévací zařízení PSH100. To slouží k odstranění nečistot a spečených shluků částic z použitého prášku, tak aby mohl být opětovně použit při výrobě.



Obr. 4-2 Stavěcí komora [12] (upraveno)

Vnitřek stavební komory můžeme vidět na Obr. 4-2. Komora je utěsněna a před výrobou je zaplavena inertním plynem (Ar, nebo N₂). Jak je patrné z Obr. 4-2, inertní plyn proudí při výrobě těsně nad stavební platformou, tak aby docházelo k odvodu spalín a dalších nečistot při tavení materiálu. Laserový paprsek do komory vstupuje přes krycí sklo, které se nachází v její vrchní části. Nanášení vrstvy prášku zajišťuje nanášecí zařízení („recoater“), který je opatřený gumovým břítem. Z nanášecího zařízení je prášek dávkován na stavební platformu pomocí drážkovaných hřídelů, kde jedna drážka je označována jako „chamber“. Množství dávkovaného prášku se tedy uvádí počtem těchto drážek. Při použití menší stavební platformy (100x100 mm) jsou do nanášecího zařízení umístěny redukční bloky, tak aby byl prášek nanášen jen v místě platformy. Při výrobě je každá nanášená vrstva zkontrolována. Nad komorou je umístěna kamera, která pořídí kontrolní snímek. Ten je následně analyzován pomocí kontrolního systému.

4.2 Práškový materiál

Hliníková slitina EN AW 2618, je teprve ve fázi odladění SLM procesních parametrů. Práškový materiál není ve standardní nabídce výrobců a je vyráběn na zakázku. Materiál použitý pro experimenty v této diplomové práci byl objednan u výrobce TLS-Technik. Jedná se o druhou dodávku tohoto materiálu od stejného výrobce.

Na vzorcích dodaného práškového materiálu byla provedena analýza distribuce velikosti částic a pořízeny SEM snímky pro zjištění morfologie částic. Na původní dodávce byla také provedena analýza chemického složení.



Obr. 4-3 Práškový materiál EN AW 2618

4.3 Experimenty

Návrh experimentů pro stanovení optimálních procesních parametrů hliníkové slitiny EN AW 2618 vychází ze současného stavu poznání zpracování hliníkových slitin třídy 2. Především pak z diplomové práce Ing. Filipa Dokoupila, na kterou tato práce navazuje.

4.3.1 Příprava staveb („Pre-processing“)

4.3.1

Před zahájením stavby je potřeba provést několik operací, které se běžně označují jako „Pre-processing“. Jedná se především o nachystání dat výroby a samotného výrobního zařízení.

Příprava SLM dat

Obdobně jako u CNC obráběcích zařízení je před stavbou potřeba připravit soubor podle, kterého SLM zařízení provádí výrobu. Generování těchto souborů se na Ústavu konstruování provádí v softwaru SLM AutoFab a nově i softwaru Materialise Magics. Vstupem do obou programů je geometrický model ve formátu STL, který může být vytvořen například v CAD modeláři, nebo pomocí 3D skenování.

Po vložení geometrického modelu do programu je potřeba každému modelu přiřadit nastavení materiálu a také jeho umístění na vybranou platformu. V nastavení materiálu se definují procesní parametry daného dílu (např. výkon laseru, skenovací rychlost, skenovací strategie, šrafovací vzdálenost, atd.).

Příprava zařízení

Před každou stavbou je potřeba připravit i výrobní zařízení. Prvním krokem je vyčištění pracovní komory. Pokud dochází ke změně použitého materiálu, je potřeba vyčistit všechny komponenty, jež přichází do styku s práškovým materiálem. Čištění se provádí pomocí papírových utěrek namočených v izopropylalkoholu (IPA).

Před použitím pro stavbu je potřeba snížit relativní vlhkost prášku pod 5%. Z toho důvodu se práškový materiál před stavbou dává vysušit do pece na 70°C po dobu 3 hodin.

Před namontováním nanášecího zařízení do pracovní komory, je potřeba zkontrolovat stav gumového bříty pro nanášení vrstvy. Pokud jeví větší známky opotřebení, je nutné jej vyměnit. Následně je do komory umístěna i stavební platforma. Posledními kroky před uzavřením komory je vyrovnaní polohy bříty vůči platformě a vyčištění skla, kterým do komory vstupuje laserový paprsek.

Po uzavření komory je zaplavena dusíkovou atmosférou. Vzniklý přetlak přibližně 12 mbar postupně vytlačí vzduch z komory. Jakmile je obsah kyslíku nižší než 2%, mohou být otevřeny ventily u filtru a zapnut nucený oběh atmosféry. Jakmile je obsah kyslíku snížen pod 0,2 % je možné nanést první vrstvu prášku a zahájit stavbu.

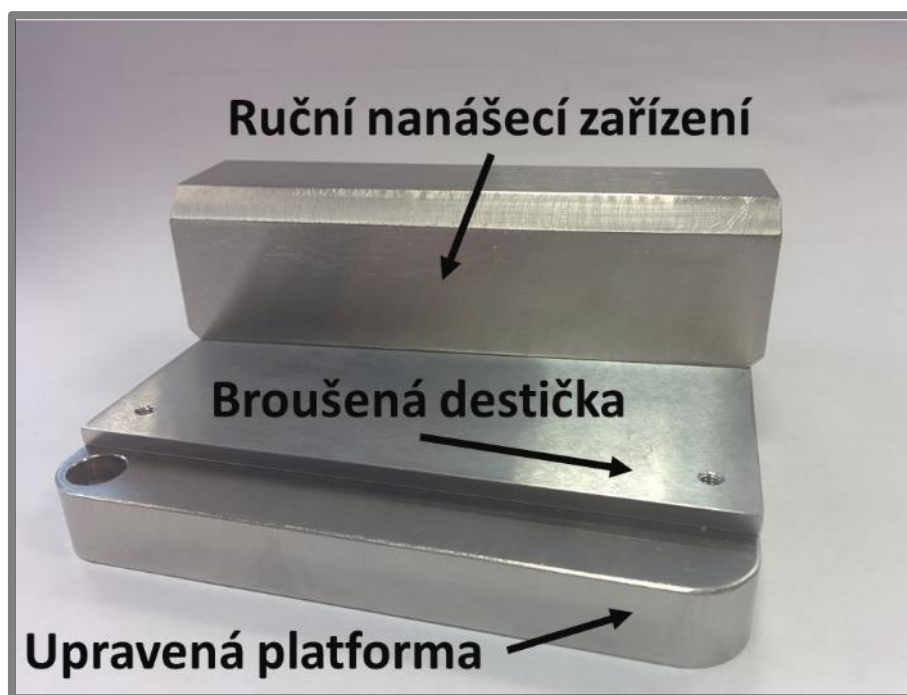
4.3.2 Návary

4.3.2

Z rešerše vyplývá, že výsledky experimentu s návary („singletracks“) mohou být významně ovlivněny nerovností platformy. Ta zapříčiňuje nerovnoměrnou tloušťku vrstvy práškového materiálu a tím může být celý experiment znehodnocen. Další vliv na rovnoměrnost práškové vrstvy má i samotné nanášení.

Aby bylo co nejvíce zamezeno ovlivnění výsledků nehomogenitou vrstvy, bylo navrženo ruční nanášecí zařízení a platforma. Ocelová platforma (Obr. 4-4) umožňuje přišroubování broušené hliníkové destičky za pomoci čtyř šroubů M4. Broušená destička by se svým chemickým složením měla co nejvíce blížit zkoumanému materiálu. Použití oddělitelné broušené destičky má také tu výhodu, že je možné provést příčný řez vzorkem pro zjištění hloubky provaření do materiálu.

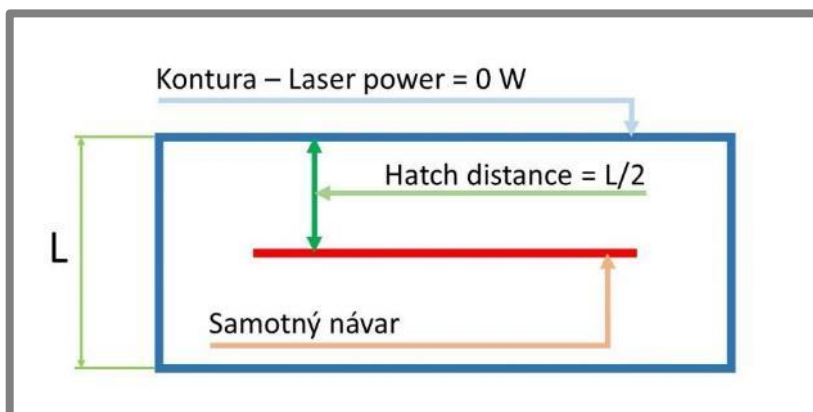
Ruční nanášecí zařízení (Obr. 4-4) je ocelový blok, který má ve spodní části vybroušenou drážku o velikosti 50 μm (výška jedné vrstvy). S jeho pomocí lze ručně nanést vrstvu prášku.



Obr. 4-4 Upravená platforma a nanášecí zařízení

Příprava dat

V softwaru AutoFab ani Magics nelze jednoduše vygenerovat pouze jednu dráhu laseru. Pro vytvoření návarových staveb je použito nastavení dle schématu (Obr. 4-5). Jako STL model je použit kvádr o rozměrech $(25 \times 1,4 \times 0,1) \text{ mm}^3$. Výkon pro skenování kontury je 0 W. Jako skenovací strategie objemu je použit „Meander“ s počátečním úhlem natočení, tak aby byla dráha šrafování rovnoběžná s hranami modelu. Hodnota hatch distance je nastavena na polovinu šířky modelu. Dojde tedy k vygenerování pouze jediné dráhy laseru.



Obr. 4-5 Schéma nastavení strategie stavby návarů

Výška modelu musí být alespoň 0,1 mm, tedy alespoň dvě vrstvy stavby. Zařízení SLM 280 HL není schopné spustit stavbu, která obsahuje pouze jednu vrstvu. Je však

možné spustit pouze poslední vrstvu stavby a tím dojde k postavení pouze jedné vrstvy.

Návarové experimenty

Celkem byly provedeny tři návarové experimenty. V rámci návarových experimentů jsou hledány optimální parametry výkonu laseru a skenovací rychlosti.

1. Test ručního nanášení

Tento experiment sloužil k ověření použitelnosti ručního nanášecího zařízení. Jedná se o tři totožné stavby pro ověření opakovatelnosti experimentů.

2. 1. Sada návarů

První polovina návaru v rozsahu skenovacích rychlostí 50-700 mm/s.

3. 2. Sada návarů

Druhá polovina návaru v rozsahu skenovacích rychlostí 750-2000 mm/s.

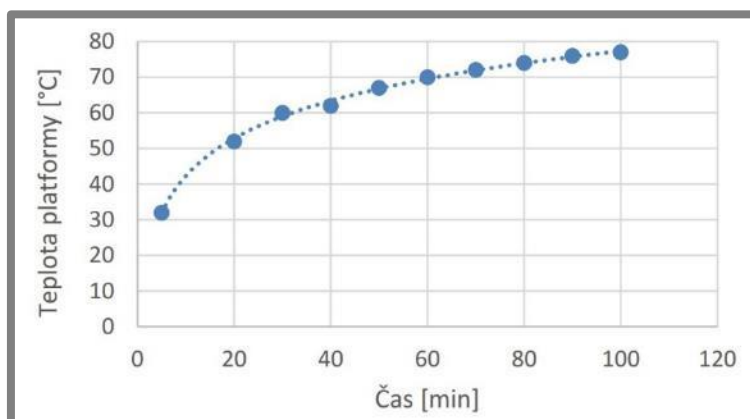
4.3.3 Objemové vzorky

4.3.3

Dle současného stavu poznání byly doposud zkoumány pouze objemové vzorky tvaru kostky o délce hrany 5 mm. U těchto vzorků se podařilo docílit maximální relativní hustoty 99,66%.

V této práci byly zkoumány objemové vzorky o velikosti $(13 \times 13 \times 5) \text{ mm}^3$, jelikož lépe simulují stavbu větších dílů, jako například vzorků pro tahovou zkoušku.

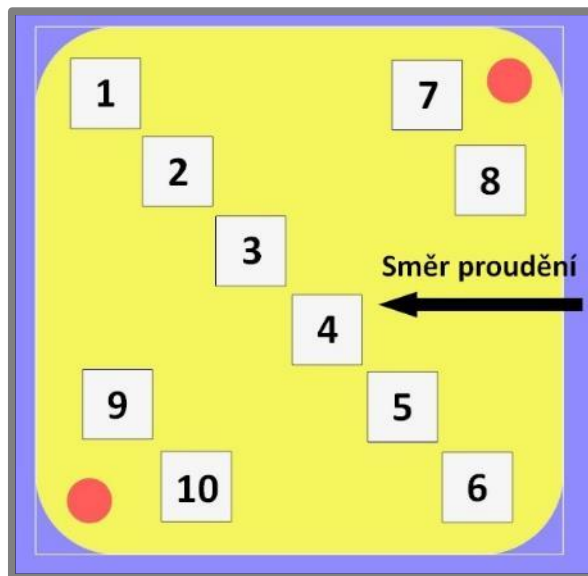
Stavba u všech objemových vzorků probíhala na menší platformě o rozměrech $(100 \times 100) \text{ mm}^2$. Předehřev platformy byl nastaven na 120°C . Při použití menší platformy je však mezi teplotní čidlo a samotnou platformu umístěn redukční sloupec. Nedochozí tedy k měření reálné teploty platformy. Dle [12] se při nastavení teploty 120°C po 100 minutách výhřevu ustálí teplota platformy na 80°C , jak je vidět na grafu (Obr. 4-6).



Obr. 4-6 Graf závislosti teploty platformy na čase výhřevu [12]

Většina experimentů objemových vzorků obsahuje 10 kostek o rozměrech $(13 \times 13 \times 5) \text{ mm}^3$. Jejich rozložení na stavební platformě můžeme vidět na Obr. 4-7. Toto rozložení vzorků na diagonále platformy má několik důvodů. Při nanášení vrstvy prášku nedojde k přejetí bříty přes všechny vzorky najednou a tím se minimalizuje možnost jeho poškození během stavby. A také při samotném skenování laserem

dochází jen k minimální kontaminaci ostatních vzorků zplodinami, které jsou unášeny prouděním atmosféry.

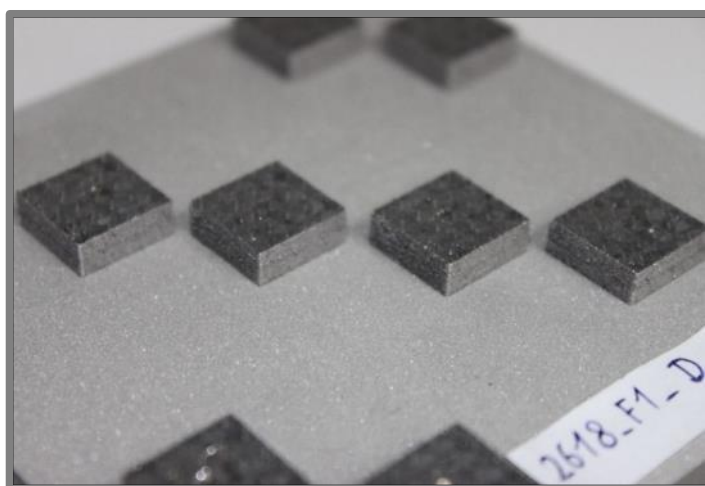


Obr. 4-7 Rozložení vzorků na platformě

Celkem bylo realizováno 20 objemových experimentů a celkový počet vzorků byl 187. Všechny vzorky byly vybroušeny a byly pořízeny jejich snímky za účelem určení porozity daného vzorku. Určení porozity je podrobněji popsáno v kapitole 4.3.4

Jednotlivé experimenty lze rozdělit do několika kategorií:

1. Experiment s velikostí vzorků
2. „Chessboard“ strategie
3. Strategie „Hull and Core“
4. Strategie „Pre-sintering“
5. Vzorky na podpůrné struktuře
6. Experiment za zvýšené teploty



Obr. 4-8 Objemové vzorky 13x13 mm

4.3.4 Vyhodnocení experimentů

Pro pořízení fotografií metalografických výbrusů vzorků byly použity dva optické mikroskopy:

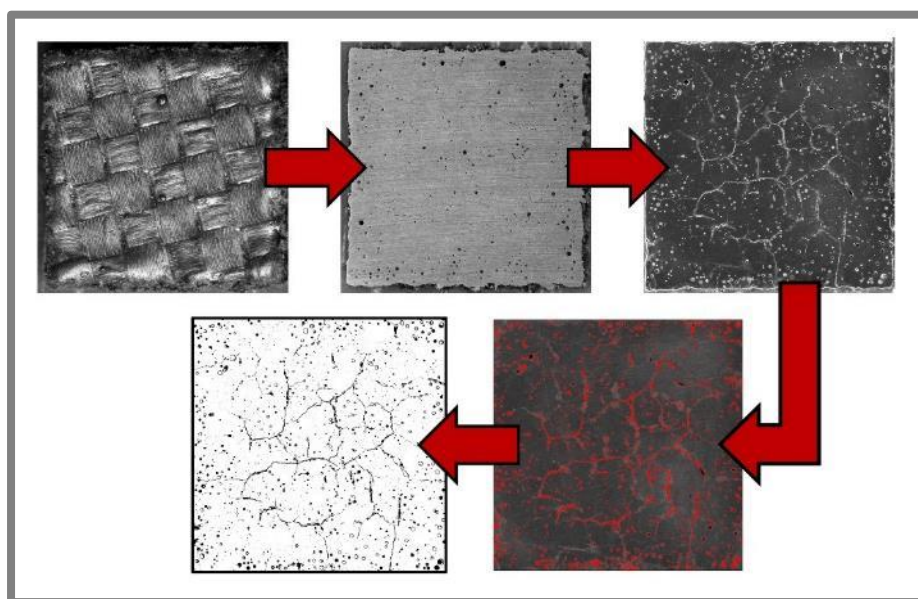
1. **Olympus SZX7** – Tento mikroskop se nachází na ústavu konstruování, v laboratoři optické digitalizace. Disponuje zvětšením 8-56x. Snímky jsou pořízeny pomocí připojeného fotoaparátu Canon 7D a softwaru QuickPHOTO MICRO.
2. **Olympus GX51** – Tento mikroskop se nachází na ústavu materiálových věd a inženýrství, v metalografické laboratoři. Disponuje zvětšením 50-1000x. Snímky jsou pořízeny pomocí připojené digitální kamery Nikon DS-Fi1 a softwaru NIS-Elements AR.

Vyhodnocení porozity

V rešeršní části práce (kap. 2.1.3) jsou zmíněné různé metody měření porozity u vzorků. V této diplomové práci budou použity dvě metody: Obrazová analýza výbrusu, μ CT.

Obrazová analýza

Nejčastěji používaná metoda vyhodnocení porozity bude analýza snímků výbrusu vzorku. Vyhodnocení probíhá za pomoci freeware softwaru ImageJ. Postup při analýze snímku můžeme vidět na Obr. 4-9.



Obr. 4-9 Postup obrazové analýzy v softwaru ImageJ

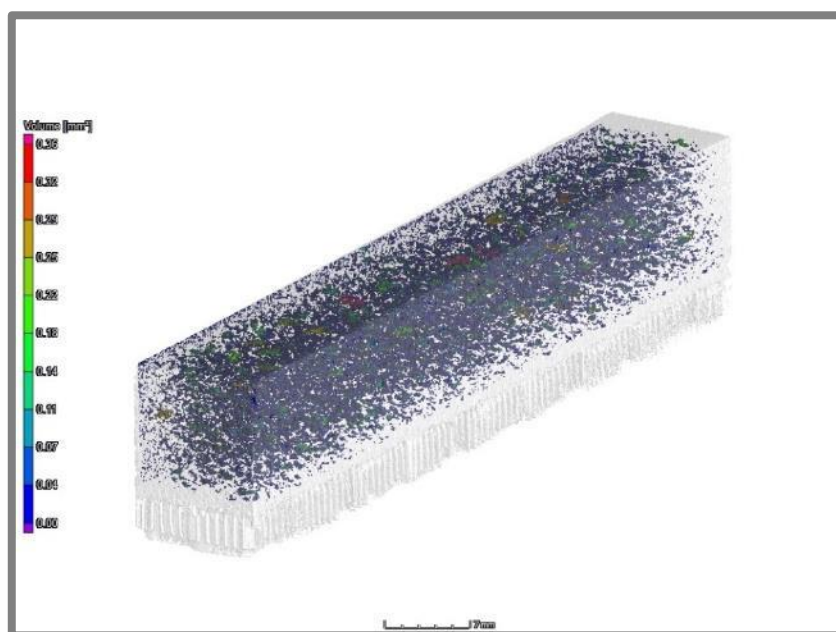
Výsledky získané pomocí této metody nedosahují takové přesnosti jako u počítačové tomografie, jelikož jsou významně ovlivněny výběrem zkoumané oblasti. Dále tato metoda neumožňuje vyhodnotit porozitu v celém objemu vzorku, protože je vyhodnocena pouze v jednom řezu, popřípadě v sérii řezů. Jedná se o destruktivní metodu, která umožňuje rychlý náhled na výskyt vad ve vzorku. Pokud je proveden pouze jediný výbrus, je tato metoda finančně nenáročná. Pro vyhodnocení drobných

vad, jako například trhlin, je možné provést následné vyleštění vzorku, což je časově i finančně náročnější.

μCT

Metoda výpočetní tomografie bude použita u vzorků, jež bude potřeba vyhodnotit v celém objemu, anebo u vzorku, u kterých nelze provést metalografický výbrus (např. vzorky na tahovou zkoušku). Vyhodnocení pomocí CT je nedestruktivní a umožňuje získat přehled o rozložení pórů v celém objemu vzorku. Při vyhodnocování větších vzorků však není schopná detekovat drobnější vady, jako například trhliny.

K vyhodnocení bude použito zařízení GE phoenix v|tome|x L240, které se nachází v laboratoři počítačové tomografie Středoevropského výzkumného institutu (CEITEC) [21]. Na Obr. 4-10 můžeme vidět vyhodnocený vzorek pro tahovou zkoušku.



Obr. 4-10 Vzorek analyzovaný pomocí μCT

Zkoušky mechanických vlastností

Po nalezení vhodných procesních parametrů pro dosažení vysoké relativní hustoty, bude přistoupeno k výrobě vzorků pro otestování mechanických vlastností. Převážně vzorků na tahovou zkoušku.

Tahová zkouška

Tahové zkoušky budou realizovány ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství. Zkoušky proběhnou na testovacím zařízení Zwick Z250, které je schopné vyvinout zatížení až 250 kN [22]. Testování proběhne za normální teploty podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Po vyrobení SLM vzorku bude polotovár následně obroben na běžný válcový vzorek o rozměrech 8x40 mm, popřípadě 6x30 mm dle normy DIN 50125. Pro srovnání mechanických vlastností budou provedeny i zkoušky

5 VÝSLEDKY

5

5.1 Testy práškového materiálu

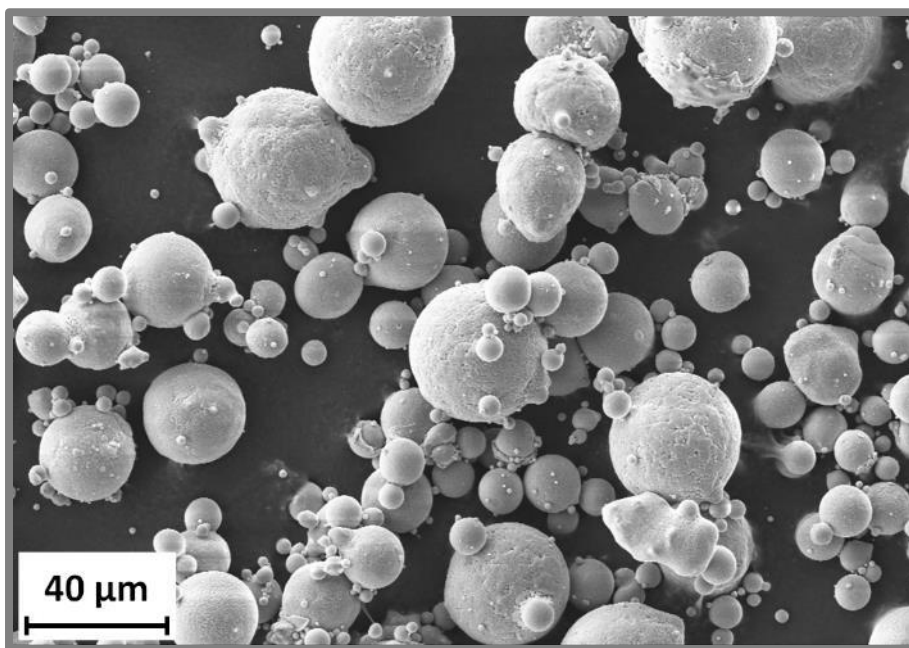
5.1

Aby byl práškový materiál vhodný pro použití při SLM procesu musí splňovat určité parametry. Nejdůležitější je distribuce velikosti částic. Mimo velikost částic práškového materiálu je také důležitý jejich tvar. Ten by se měl pokud možno blížit kulovému tvaru. V neposlední řadě je také důležité, aby bylo dodrženo chemické složení prášku.

5.1.1 Morfologie částic

5.1.1

Pro prozkoumání morfologie částic práškového materiálu byly pořízeny snímky za pomoci rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM). Na snímku (Obr. 5-1) můžeme pozorovat, že většina částic má kulovitý tvar. Částic s nepravidelným tvarem je jen minimum. Za to se ve vzorku prášku vyskytuje větší množství malých částic, které se shlukují dohromady a přichytávají se na částice větší. Tento fakt by měl napomoci tvorbě rovnoměrné vrstvy, kde menší částice zaplní prostor mezi většími. Další SEM snímky jsou dostupné v příloze 1.



Obr. 5-1 SEM snímek morfolgie částic

5.1.2 Analýza chemického složení

5.1.2

Analýza chemického složení práškového materiálu byla provedena ve spolupráci s Přírodovědeckou fakultou Masarykovy univerzity.

Analýza byla provedena pomocí zařízení iCAP 6500 Duo. Toto zařízení pracuje na principu emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES). Mlýný roztok zkoumaného vzorku je zaveden do plazmového hořáku. Chemické vazby sloučenin ve vzorku okamžitě zanikají a elektrony v atomech jsou excitovány na vyšší energetickou hladinu. Ta je nestabilní, a proto dochází k propadu na původní hladinu. Při tomto procesu je emitováno světlo o dané vlnové délce, jenž je určena

energetickým rozdílem obou hladin. Z intenzity tohoto emitovaného světla je poté určeno množství daného prvku.[13]

V Tab. 5-1 můžeme vidět srovnání výsledků měření práškového materiálu se slitinou EN AW-2618 dle normy ČSN EN 573-3 [15]. Protokol analýzy chemického složení se nachází v příloze 2.

Tab. 5-1 Srovnání chemického složení

Hm. %	Cu	Fe	Mg	Ni	Si	Ti
SLM prášek	2,66	1,00	1,39	1,22	0,149	0,206
EN AW-2618	1,8-2,7	0,9-1,4	1,2-1,8	0,8-1,4	0,15-0,25	0,2

Ze srovnání můžeme vidět, že hmotnostní zastoupení většiny legujících prvků je v normě. Pouze křemík a titan jsou na hranici intervalu. Jedná se však o dva nejméně zastoupené prvky ve slitině a odchylka od normy je v řádu tisícín procenta. Vzhledem k měřicí přesnosti zařízení je tento rozdíl zanedbatelný. Práškový materiál použitý pro experimenty můžeme označovat jako EN AW-2618.

5.1.3 Analýza distribuce velikosti částic

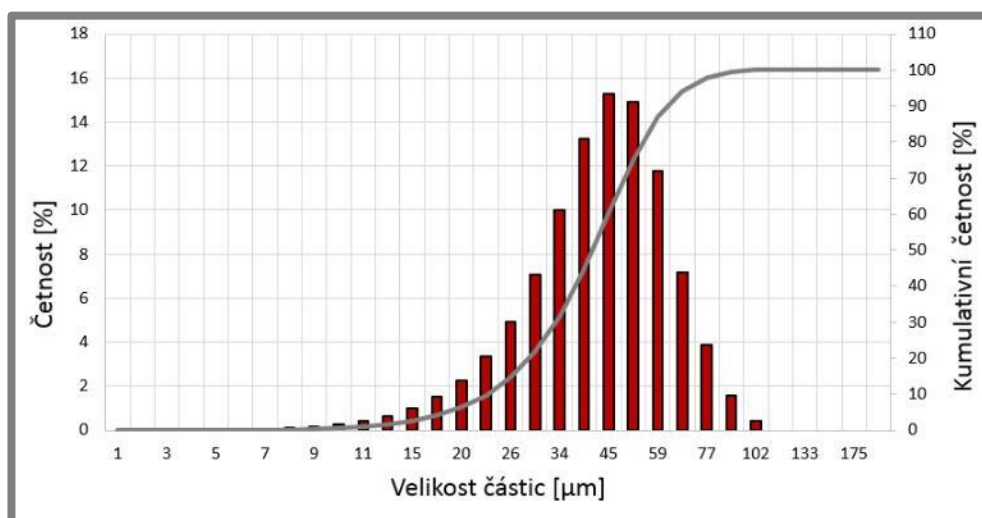
Jedním z nejdůležitějších parametrů pro SLM proces je u práškového materiálu distribuce velikosti částic materiálu. Při nevhodné distribuci může docházet k chybám při nanesení vrstvy prášku. Při výskytu větších částic dochází k jejich zachycení o břit nanášecího zařízení a vzniku rýhy ve vrstvě.

Distribuce velikosti částic byla zjištěna za pomoci zařízení Horiba LA 950. Jedná se o analyzátor velikosti částic, který funguje na principu laserové difrakce. Laserový paprsek prosvěcuje zkoumaný vzorek částic a podle jejich velikosti dochází k odrazu s různou intenzitou a pod různým úhlem. Tyto hodnoty jsou snímány pomocí fotodetektorů a převedeny na elektrický signál. Na základě algoritmu ve vyhodnocovacím softwaru jsou vytvořeny frekvenční a distribuční křivka. Zařízení je schopné měřit části v intervalu 10 nm – 5 mm s garantovanou přesností $\pm 0,6$ %.[16]

Celkem byly analyzovány čtyři náhodně vybrané vzorky prášku. Výsledky měření můžeme vidět v Tab. 5-2. Frekvenční a distribuční křivku z prvního měření můžeme vidět na Obr. 5-2. Protokol z měření se nachází v příloze 3.

Tab. 5-2 Výsledky analýzy distribuce velikosti částic

číslo vzorku	střední hodnota [μm]	Medián [μm]	D ₁₀ [μm]	D ₉₀ [μm]
1	42,06	41,04	22,99	62,49
2	38,86	37,62	20,61	58,25
3	39,09	38,10	21,97	57,20
4	40,38	39,42	22,46	58,95
Průměr	40,09	39,05	22,01	59,22



Obr. 5-2 Graf frekvenční a distribuční křivky

Střední hodnota ze všech měření se pohybuje kolem hodnoty 40 μm . Hodnota D_{90} , tedy velikost pod kterou se nachází 90% částic, vychází přibližně 60 μm . V Tab. 5-3 můžeme vidět srovnání měření nové a původní várky práškového materiálu. U nové várky prášku je střední hodnota o více jak 10 μm nižší. Hodnota D_{90} je téměř o 19 μm nižší. Z toho vyplývá, že nová várka již splňuje deklarovaný rozsah částic 20–63 μm . Stále však obsahuje kolem 4 % částic, jež jsou větší než 70 μm . Jak již bylo zmíněno, tyto částice mohou způsobovat problémy při nanášení vrstvy a negativně ovlivnit proces tavení materiálu.

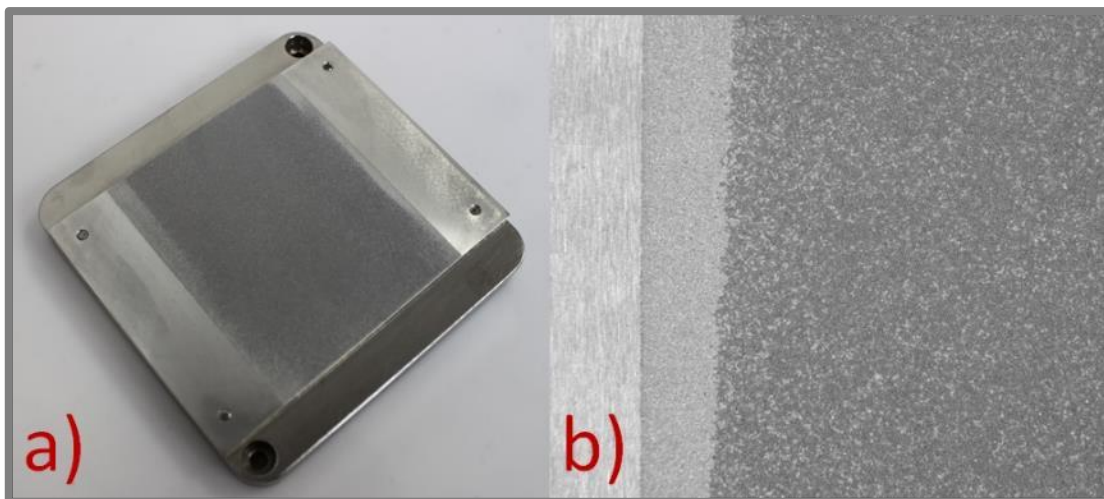
Tab. 5-3 Srovnání distribuce částic nového a původního práškového materiálu

Rok objednání	střední hodnota [μm]	Medián [μm]	D_{10} [μm]	D_{90} [μm]
2015	51,63	50,10	26,25	77,99
2016	40,09	39,05	22,01	59,22

5.2 Návary

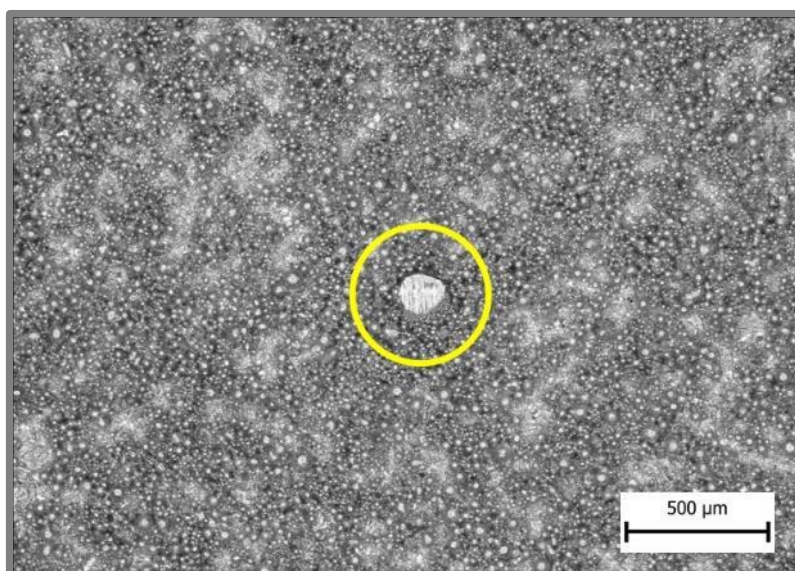
5.2.1 Test ručního nanášení

Pro ověření funkčnosti ručního nanášecího zařízení byl navržen prvotní návarový experiment. Jedná se o tři totožné stavby, které vychází z předchozích návarových testů Ing. Dokoupila. Tento experiment sloužil hlavně k otestování ručního nanášení. Bylo zkoumáno, zda je schopen opakovaně nanést rovnoměrnou vrstvu a tím umožnit reprodukovatelnost návarových experimentů. Ručně nanesenou vrstvu prášku můžeme vidět na Obr. 5-3.



Obr. 5-3 a) Platforma s ručně nanesenou vrstvou, b) Ručně nanesená vrstva (8x zoom)

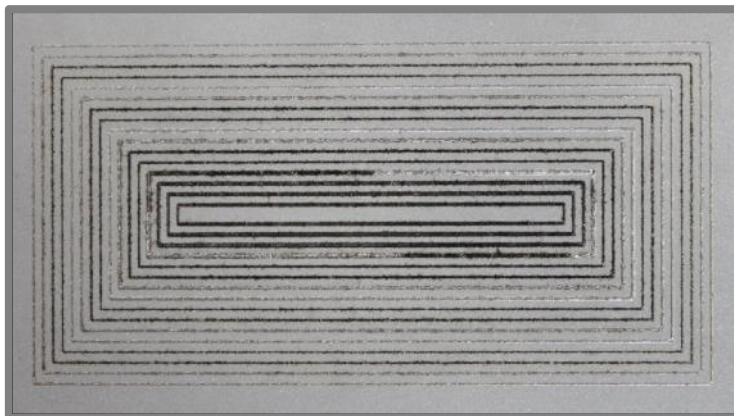
Na Obr. 5-3b můžeme vidět, že nanesená vrstva prášku je rovnoměrná. Při pohledu na detail (Obr. 5-4) je vidět částici o velikosti přes 90 μm . Její výskyt ve vrstvě potvrzuje výsledky měření distribuce velikosti částic.



Obr. 5-4 Detail na nanesenou vrstvu (56x Zoom)

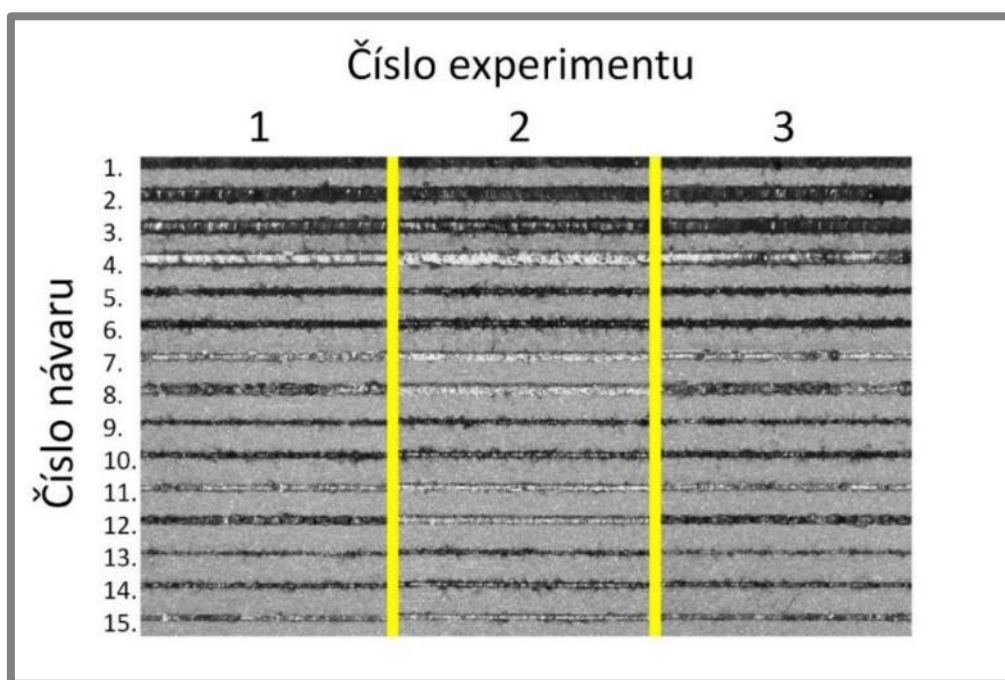
Po nanesení rovnoměrné vrstvy byla platforma vložena do zařízení a po vytvoření inertní atmosféry a přehřátí platformy došlo ke stavbě návarů. Každá stavba

obsahovala 16 návarů. Návary byly provedeny jako zvětšující se obdélníky od středu platformy, jak je vidět na Obr. 5-5. U návarů byly měněny hodnoty výkonu laseru a skenovací rychlosti. U těchto návarů byla vyhodnocena pouze jejich šířka za pomoci mikroskopu Olympus SZX7.



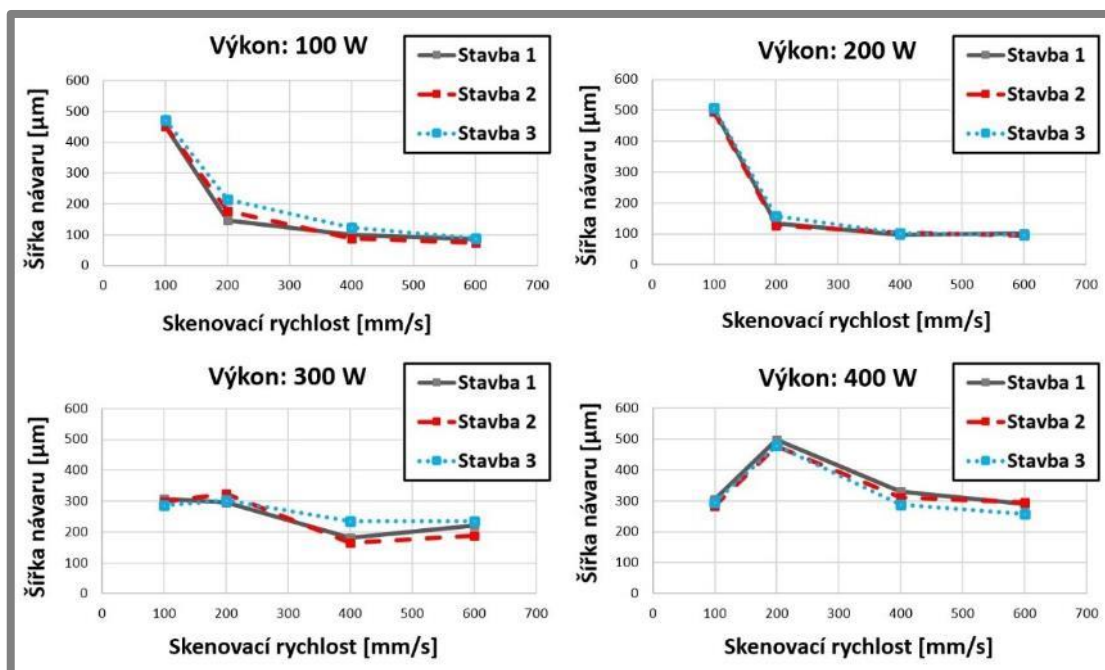
Obr. 5-5 Prvotní návarový test

Výsledky experimentu můžeme vidět na Obr. 5-6. Jedná se o vizuální srovnání návarů mezi jednotlivými stavbami. Na srovnání lze vidět, že všechny návary jsou kontinuální a jejich šířka je téměř konstantní.



Obr. 5-6 Srovnání šířek zkušebních návarů

Stejné výsledky ukazuje i srovnání naměřených šířek návarů. Na Obr. 5-7 můžeme vidět čtyři grafy závislosti šířky návaru na skenovací rychlosti pro různé výkony laseru. V každém grafu jsou zobrazeny tři křivky pro jednotlivé stavby. Maximální odchylka naměřené šířky návaru je 60 μm . Pomocí ručního nanášecího zařízení lze opakovaně nanést rovnoměrnou vrstvu a výsledky návarových experimentů lze reprodukovat.

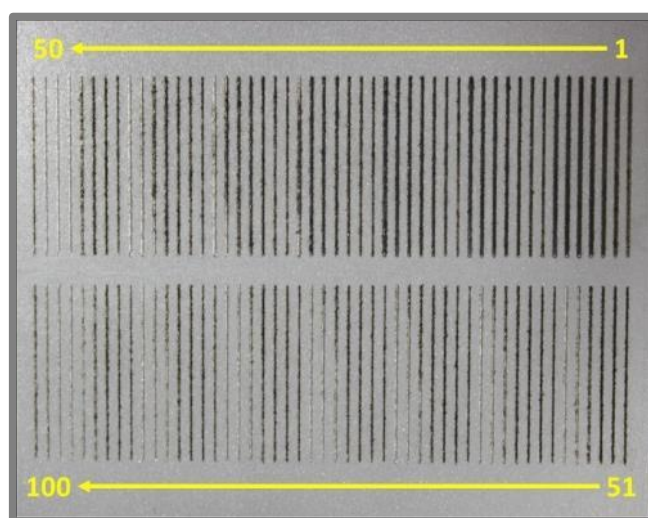


Obr. 5-7 Grafy srovnání jednotlivých staveb testu ručního nanášení.

5.2.2 1. sada návarů

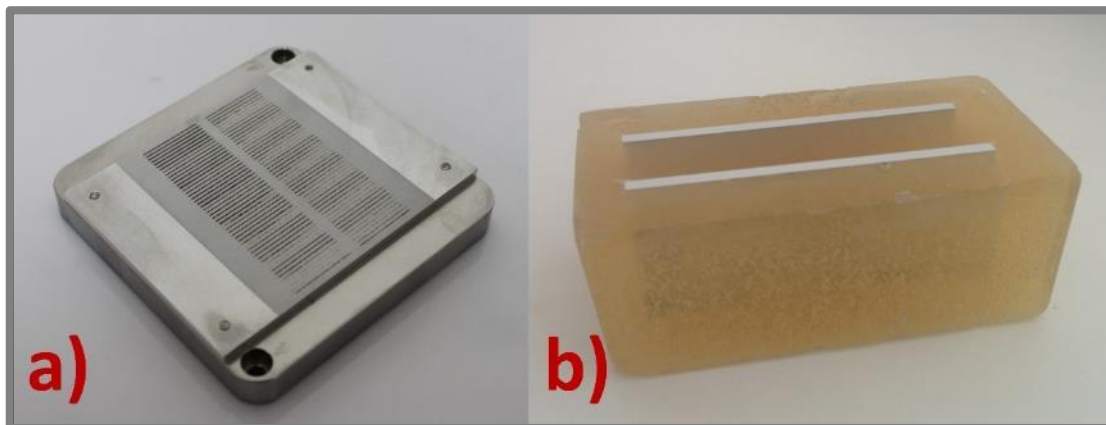
Po ověření funkčnosti ručního nanášecího zařízení byl navržen experiment pro prozkoumání větší oblasti procesních parametrů. Při tomto experimentu byly měněny hodnoty výkonu laseru v rozsahu 100-400 W a skenovací rychlosti v rozsahu 50-700 mm/s. Oblast nižších rychlostí byla vybrána na základě rešerše, kde nejlepších výsledků u objemových vzorků bylo docíleno s rychlostí 100-200 mm/s. Dále byly přidány dva vzorky se skenovací rychlostí 1000 a 1400 mm/s.

Celkem experiment obsahoval 100 návarových vzorků. Jejich délka byla 20 mm a rozestup mezi nimi byl 1,2 mm. Výsledek stavby můžeme vidět na Obr. 5-8.



Obr. 5-8 První sada návarů

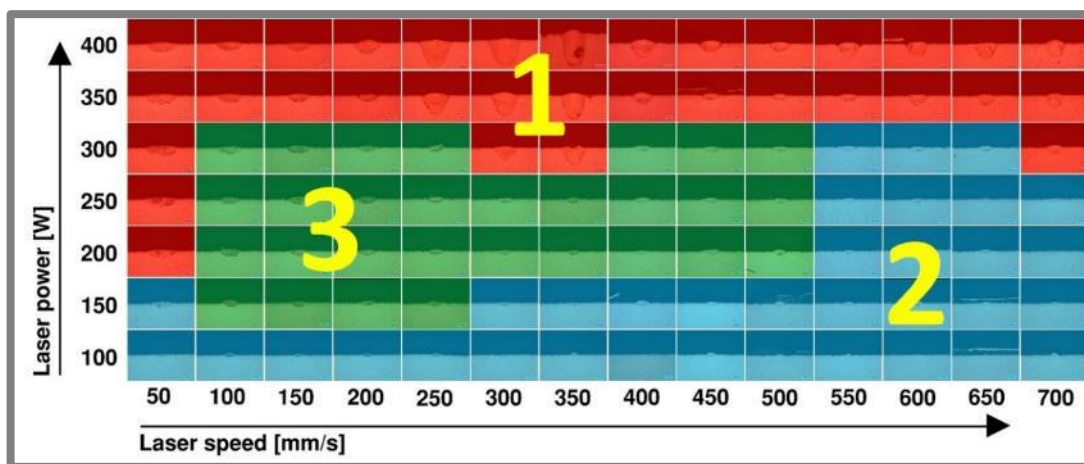
Realizována sada návaru (Obr. 5-9a) byla nejprve vyfocena z vrchu pomocí zařízení Olympus SZX7 pro vyhodnocení kontinuálnosti návaru. Následně byla hliníková destička, na které jsou návary umístěné, příčně rozřezána, zalitá do bloku, vybroušena a vyleštěna. Výsledný metalografický vzorek můžeme vidět na Obr. 5-9b.



Obr. 5-9 a) Návary po dokončení stavby, b) Metalografický vzorek návarů

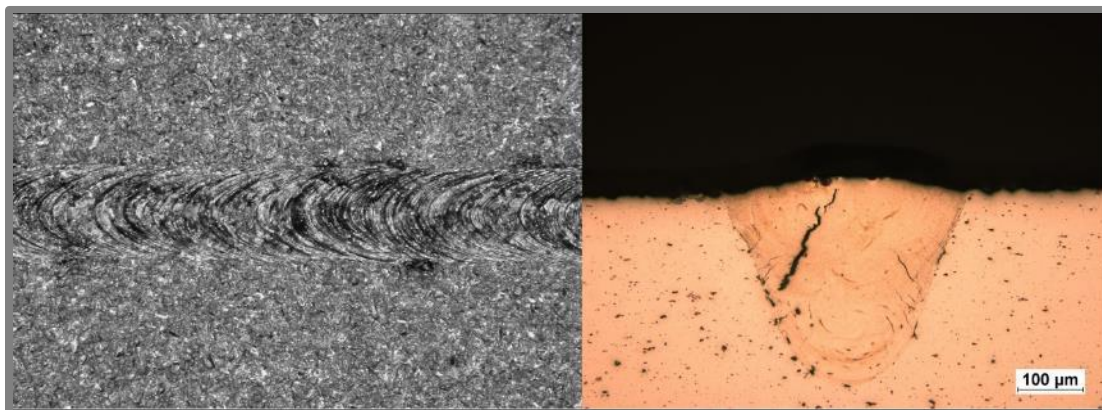
Pro zobrazení mikrostruktury materiálu byl vzorek naleptán pomocí leptadla s obchodním názvem Fuss. Jedná se o roztok 7,5 ml HF, 25 ml HCl, 8 ml HNO₃, 1000 ml H₂O. Následně byly pořízeny snímky průřezu návaru za pomoci mikroskopu Olympus GX51. Použité zvětšení objektivu bylo 200x. Pomocí softwaru NIS-Elements byly změřeny velikosti šířky, výšky návaru a velikost hloubky průvaru do materiálu.

Z těchto snímků byla sestavena procesní mapa, která se ve vysokém rozlišení nachází v příloze 4, její náhled můžeme vidět na Obr. 5-10.



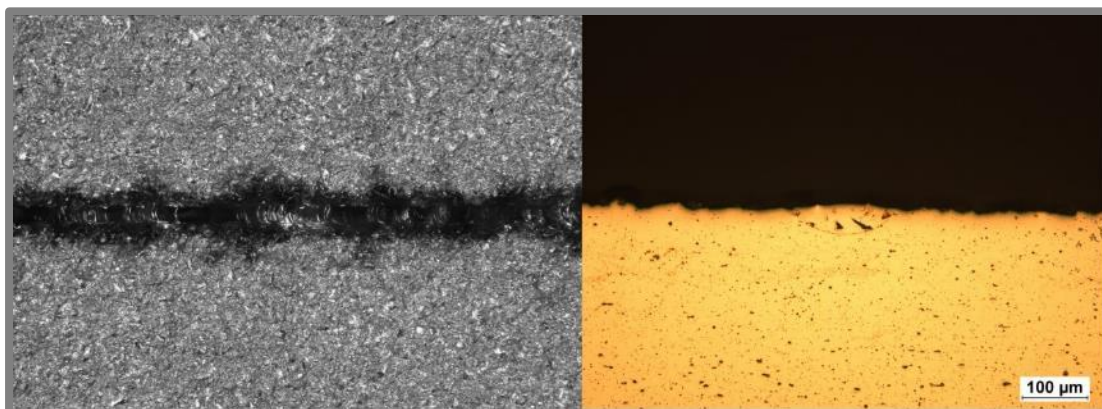
Obr. 5-10 Procesní mapa návarů (první sada)

Cela procesní mapa se dá rozdělit na tři oblasti. První oblast (v náhledu označená červeně) je oblast s přebytkem energie. Laser natavuje prášek s takovou energií, že dochází ke značnému propálení do podkladové desky a velikost výšky návaru jen minimální. Kvůli přebytku energie také vzniká velký teplotní gradient a v důsledku prudkého ochlazení vznikají v návaru trhliny, jak je vidět na Obr. 5-11.



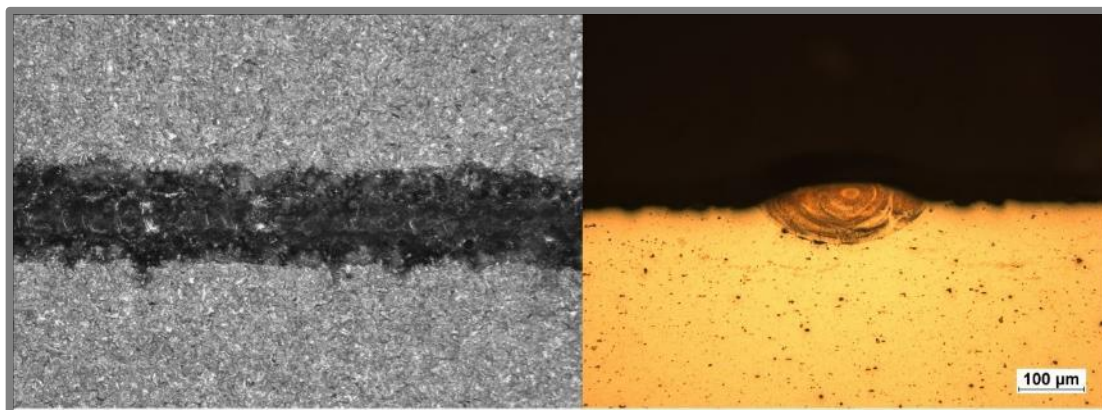
Obr. 5-11 Zástupce oblasti 1 (Návar č. 41)

Druhá oblast (v náhledu označená modře) je naopak oblast s nízkou energií (Obr. 5-12). V tomto případě je vidět že návar je nekontinuální. S podkladovou deskou je propojen jen minimálně, a vůbec nedochází ke stavbě materiálu. Většina nataveného práškového materiálu jen vytvoří v rámci minimalizace povrchového napětí kuličky kovu, které jsou prouděním atmosféry odneseny pryč.



Obr. 5-12 Zástupce oblasti 2 (Návar č. 80)

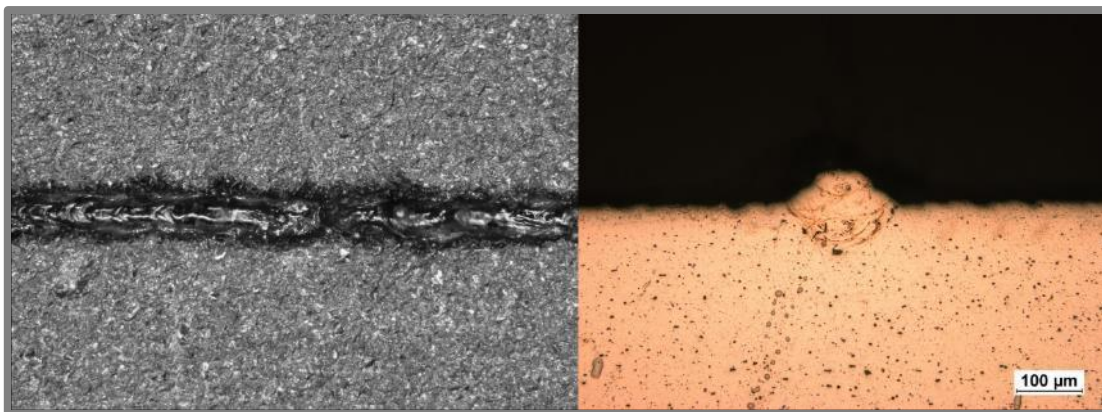
Poslední třetí oblast (v náhledu označená zeleně). Tyto návary jsou vhodné pro SLM proces, nejsou však optimální. Podle průřezu (Obr. 5-13) je hloubka průvaru téměř stejně velká jako výška samotného návaru. Dochází tedy ke stavbě materiálu a zároveň k dobrému propojení s podkladovou deskou. Snímek z vrchu však ukazuje,



Obr. 5-13 Zástupce oblasti 3 (Návar č. 11)

že návar není úplně kontinuální a také je vidět černá opálená oblast kolem návaru. Na snímku průřezu jsou na hranicích návaru viditelné menší trhliny.

Mimo návary v rozsahu 50-700 mm/s byly k tomuto experimentu přidány i dva návary o výkonu laseru 400 W a rychlosti 1000 a 1400 mm/s. Tyto návary se ukazují jako vhodné pro SLM proces (Obr. 5-14). Hloubka průvaru je stejně veliká jako výška návaru a blíží se hodnotě 50 μm , což je zároveň i tloušťka vrstvy při stavbě objemových vzorků. Snímek z vrchu ukazuje, že návar je téměř kontinuální, avšak i u tohoto návaru jsou viditelné drobné trhliny.



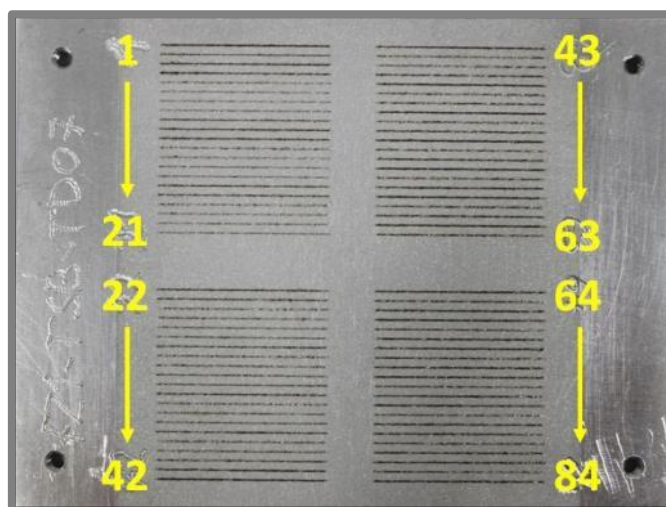
Obr. 5-14 Zástupce vyšších rychlostí (Návar č. 100)

Z výše uvedeného důvodu byla oblast vyšších rychlostí podrobněji prozkoumána v druhé sadě návarových experimentů.

5.2.3 2. sada návarů

5.2.3

Na základě výsledků první sady návarů byl navržen druhý experiment. Nastavení výkonu laseru se opět pohybovalo v intervalu 100-400 W. Skenovací rychlost se v tomto případě pohybovala v rozsahu 750-2000 mm/s. Jelikož se v předchozím experimentu oblast nižší energie (nízký výkon, vysoká rychlost) ukázala jako neperspektivní, byla v tomto experimentu vynechána. Experiment obsahoval celkem 84 návarových vzorků. Pro jednodušší vyhotovení metalografického výbrusu byly vzorky na platformě rozděleny do čtyř částí (Obr. 5-15).



Obr. 5-15 Druhá sada návarů

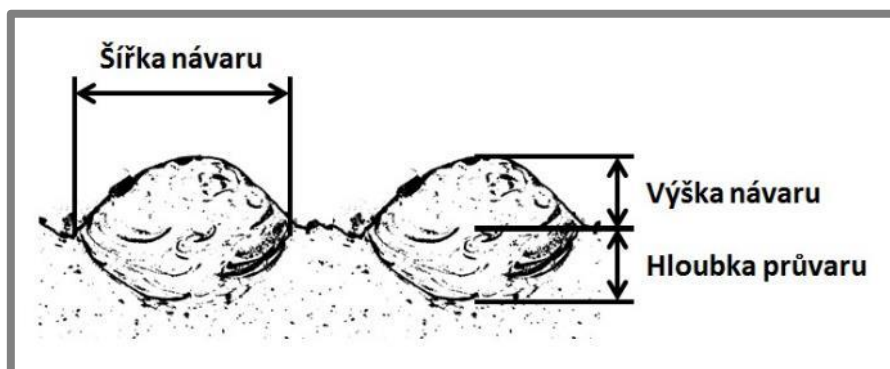
Tab. 5-4 Srovnání návaru stejných parametrů

Oblast 1 (červená) a oblast 2 (modrá) obsahují obdobné vzorky jako v prvním experimentu. Jedná se o vzorky s přebytkem a nedostatkem energie.

Výsledky návarových experimentů budou sloužit pro určení vhodného nastavení hodnoty šrafovací vzdálenosti u objemových vzorků.

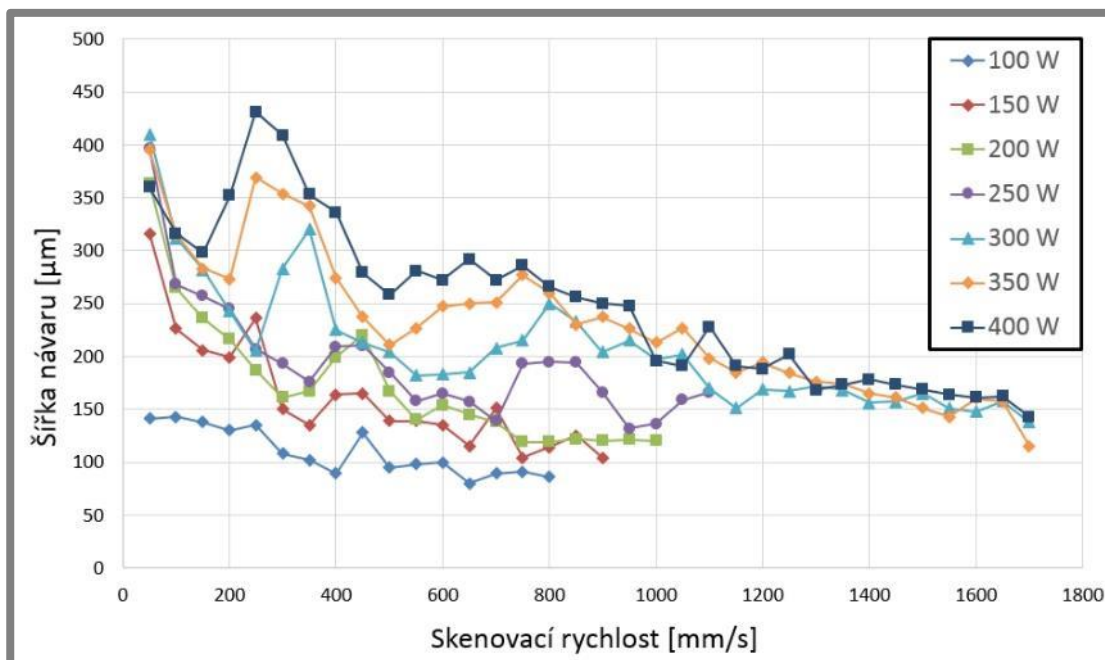
5.2.4 Vyhodnocení velikosti návarů

U všech návarových vzorků bylo na snímku provedeno měření hlavních rozměrů návarů. Odměřené veličiny jsou znázorněny na Obr. 5-18. Jedná se o šířku návaru, výšku návaru vystupující nad okolní materiál a také hloubku provaření návaru do materiálu platformy.



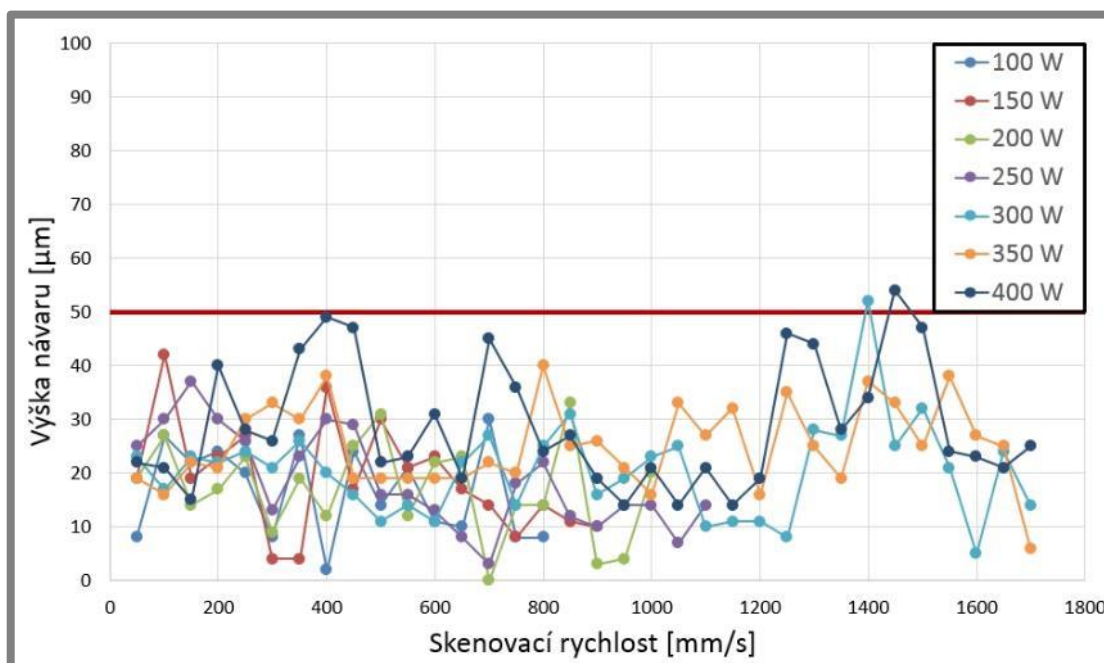
Obr. 5-18 Znázornění měřených veličin na návaru

Na grafu (Obr. 5-19), můžeme vidět křivky závislosti velikosti šířky návaru na skenovací rychlosti pro různé nastavení výkonu laseru. Většina křivek sleduje stejný trend, kdy s rostoucí skenovací rychlostí se šířka postupně zmenšuje. U výkonu laseru 300 W a více však můžeme pozorovat prudký nárůst šířky návaru v oblasti skenovací rychlosti 200-300 mm/s. Po tomto nárůstu mají křivky klesající trend a od hodnoty skenovací rychlosti 1200 mm/s a výše dojde k jejich ustálení na hodnotě 170 μm .



Obr. 5-19 Graf závislosti velikosti šířky návaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru

Druhý graf (Obr. 5-20), zobrazuje závislost velikosti výšky návaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru. Výška návaru se se změnou skenovací rychlosti nijak zásadně nemění a drží se na konstantní úrovni. Pro většinu návarů se jedná o hodnotu 30 μm . Pouze u výkonu laseru nad 300 W dochází u několika návarů k dosáhnutí nebo překročení hranice 50 μm (v grafu znázorněna červenou čarou).



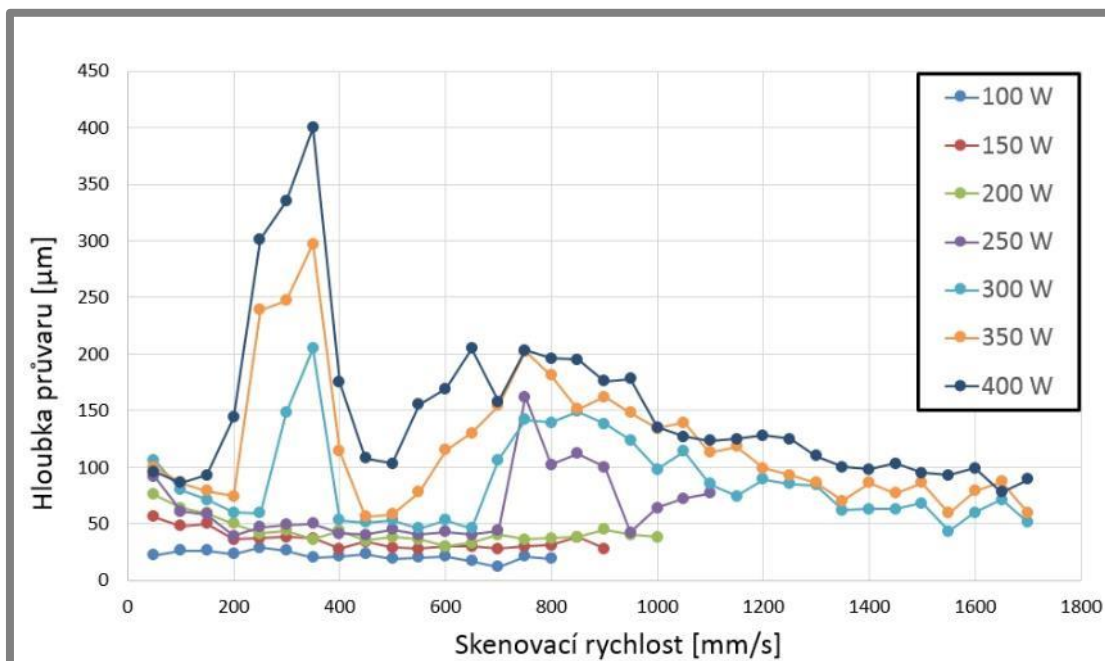
Obr. 5-20 Graf závislosti velikosti výšky návaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru

Třetí graf (Obr. 5-22) zobrazuje závislost velikosti hloubky průvaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru. Pro hodnoty výkonu laseru 100-250 W nedochází se změnou skenovací rychlosti ke kolísání hloubky průvaru. Každá z křivek je ustálená na určité konstantní hodnotě a tato hodnota se zvyšujícím se výkonem, tedy i větší vstupní energií, roste. Průměrně se pohybuje kolem hodnoty 30 μm , která je pro SLM proces dostačující.

Pro hodnoty výkonu laseru 300 W a více opět dochází k prudkému nárůstu hloubky průvaru obdobně jako tomu bylo u šířky návaru. K tomu nárůstu dochází ve stejné oblasti skenovacích rychlostí, avšak v tomto případě hned po nárůstu následuje stejný prudký pokles následovaný mírnějším nárůstem. V oblasti vyšších skenovacích rychlostí dojde k ustálení v oblasti hloubky průvaru 60-100 μm .

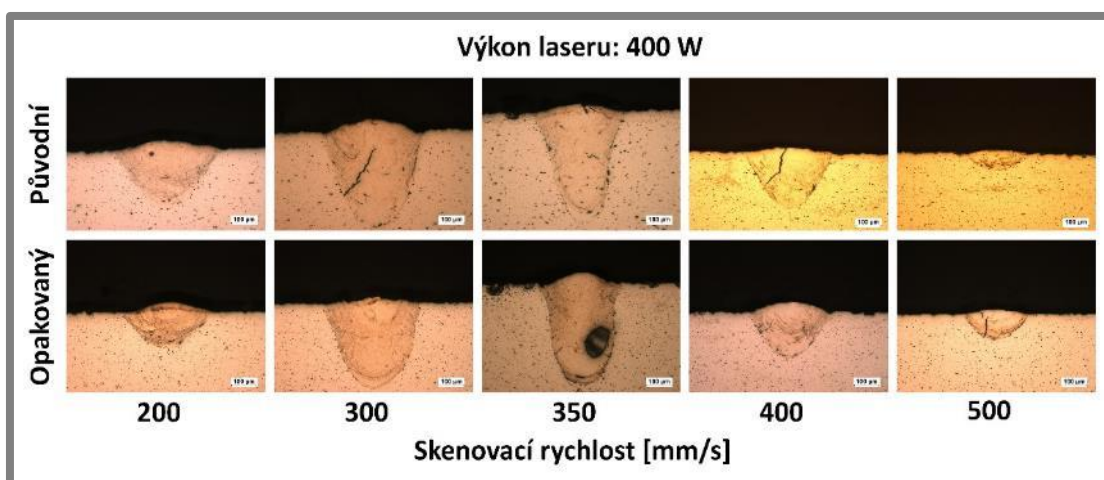
Tato anomálie byla zprvu přisuzována chybě v nanesené vrstvě. Pokud by došlo ke skenování místa, kde není nanesen materiál, popřípadě je jen minimální vrstva práškového materiálu, mohlo by to vést k tak hlubokému protavení do podkladové desky, jak bylo sledováno. Proti této hypotéze stál fakt, že jednotlivé vzorky, u kterých byla pozorována zvýšená hloubka průvaru se nacházely na odlišných místech platformy. Muselo by tedy dojít několika menším chybám ve vrstvě.

Aby byla zcela vyloučena možnost ovlivnění výsledků nerovnoměrností nanesené vrstvy, byl celý experiment reprodukován. Výsledky u reprodukování experimentu byly totožné s tím původním. Na Obr. 5-21 se nachází srovnání původního a opakovaného experimentu. Hypotéza s nerovnoměrnou vrstvou tedy byla zamítnuta.



Obr. 5-22 Graf závislosti velikosti hloubky průvaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru

Další hypotéza spočívá ve změně optických vlastností práškového materiálu, popřípadě tavné lázně. Hatch [26] ve své publikaci uvádí, že odrazivost hliníkových slitin je závislá na teplotě, drsnosti povrchu a výskytu oxidační vrstvy. Odrazivost se také může měnit i se změnou skupenství. Tyto vlivy mohou mít za následek sníženou odrazivost materiálu při skenovací rychlosti 350 mm/s a výkonu laseru 400 W, kdy byla hloubka průvaru největší. Díky snížené odrazivosti pohltí materiál více energie a dojde k hlubšímu průvaru. Snížená hloubka průvaru u nejnižších skenovacích rychlostí může být také způsobena zvýšeným odpařováním materiálu. Kde v důsledku vysoké vstupní energie dochází ke zvýšenému odpařování materiálu a vzniklé zplodiny způsobují rozostření laserového paprsku.

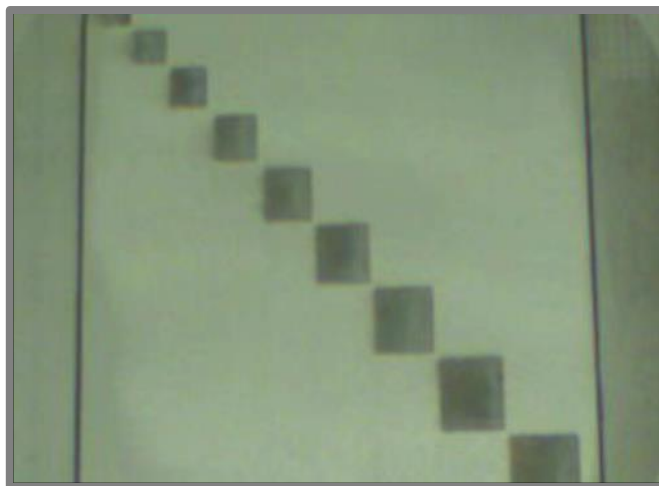


Obr. 5-21 Srovnání návaru původního a opakovaného experimentu

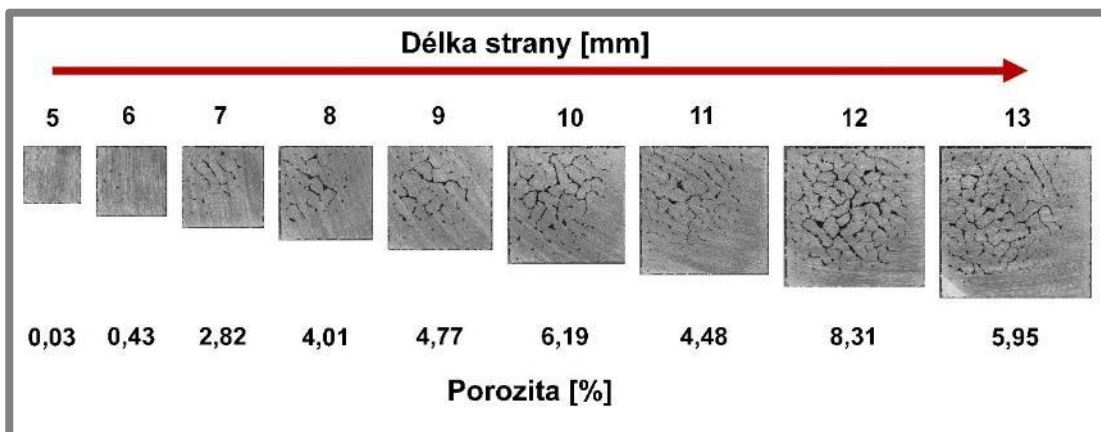
5.3 Objemové vzorky

5.3.1 Experiment s velikostí vzorků

Všechny doposud provedené experimenty objemových vzorků byly provedeny na kostkách o velikosti $(5 \times 5 \times 5) \text{ mm}^3$. Pro zjištění vlivu velikosti vzorku na výslednou porozitu byl navržen experiment se zvětšujícími se kostkami. V jedné stavbě bylo postaveno 9 kostek se stejnými parametry tisku. Délka strany čtvercového průřezu vzorku se však postupně zvětšovala z 5 mm až na 13 mm. Na Obr. 5-23 můžeme vidět snímek pořízený během stavby.

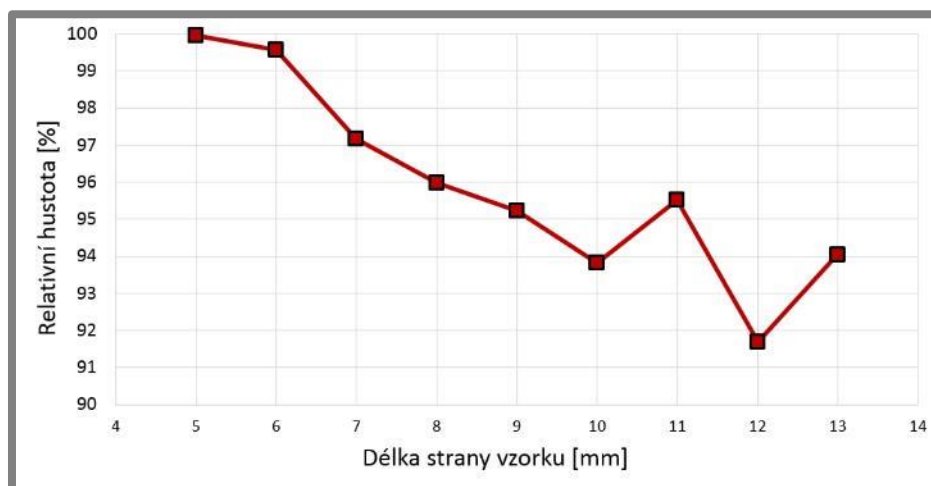


Obr. 5-23 Experiment zvětšujících se vzorků při stavbě



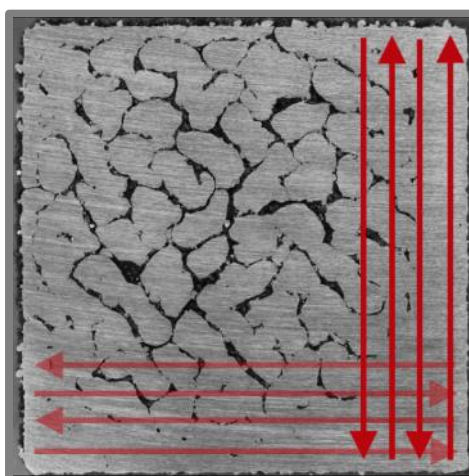
Obr. 5-24 Výbrusy zvětšujících se vzorků

Jak je patrné ze snímků (Obr. 5-24) a také z grafu (Obr. 5-25). Při rostoucí velikosti vzorku roste také naměřená porozita. Od dvojnásobné velikosti strany, tedy 10 mm se průměrná porozita vzorku pohybuje okolo 6 %. Parametry, které fungují u vzorků s malým objemem, u větších vzorků naprosto selhávají.



Obr. 5-25 Graf závislosti relativní hustoty na délce strany vzorku

Nárůst porozity u větších vzorků může být způsoben použitím nevhodné skenovací strategie. Pro stavbu malých kostek byla použita skenovací strategie „Meander“. U této strategie je objem skenován postupně z jedné strany na druhou. V další vrstvě je poté skenování pootočeno o určitý úhel (Obr. 5-26). V tomto případě o 90° .



Obr. 5-26 Vzorek s naznačením skenovací strategie „Meander“

Na Obr. 5-26 můžeme vidět řez vzorkem s naznačenými dráhami skenování laserem. Porozita se na vzorku začíná objevovat až od určité vzdálenosti od začátku skenování. Při delším skenování jednoho místa se vzorek značně zahřeje a vzniklý teplotní gradient může mít za následek vznik trhlin a následně pórů.

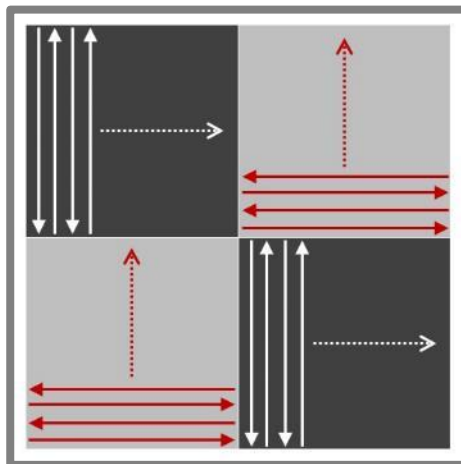
5.3.2 „Chessboard“ strategie

5.3.2

Jelikož se ukázalo, že strategie „Meander“ není vhodná pro větší objemové vzorky (13x13 mm), byly navrženy série experimentů pro prozkoumání vlivu různých skenovacích strategií na výslednou porozitu vzorku a také na výskyt trhlin.

První série experimentů sloužila k odladění procesních parametrů skenovací strategie „Chessboard“ (Obr. 5-27). Ta spočívá v tom, že daná vrstva stavby je rozdělena na černé a bílé pole, stejně jako na šachovnici. Tyto pole jsou skenovány postupně, tak

jak je znázorněno na Obr. 5-27. Díky tomu dojde k lepšímu rozložení energie v objemu celého dílu.



Obr. 5-27 Chessboard strategie

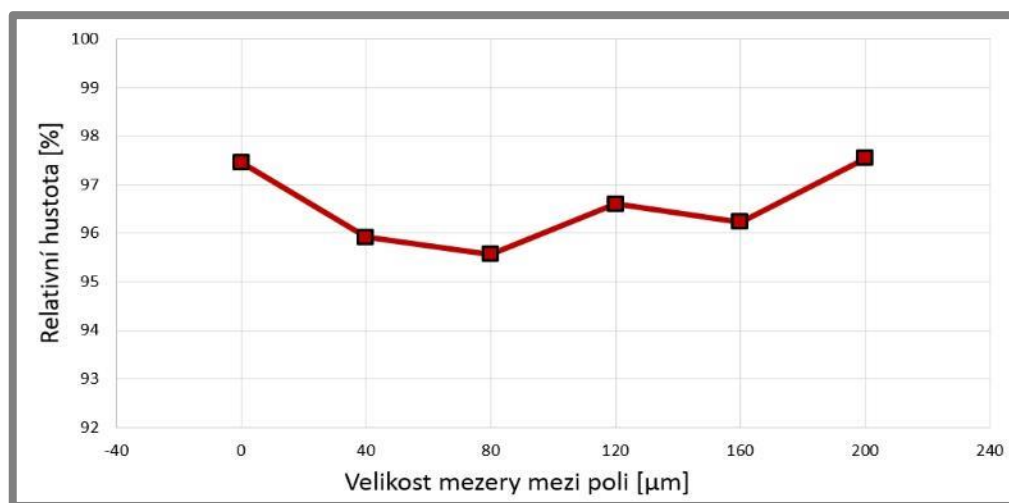
Celkem bylo realizováno 7 staveb obsahujících 66 vzorků. Mezi zkoumané procesní parametry patří:

- Přesah pole – velikost překrytí sousedících polí šachovnice
- „Out in spiral“ – postup skenování jednotlivých polí šachovnice
- Velikost pole – velikost jednoho pole šachovnice

Přesah pole

Prvním zkoumaným procesním parametrem byl přesah pole. Jedná se o velikost přesahu či mezery mezi sousedícími poli šachovnice u strategie „Chessboard“. Při zadání kladných hodnot se jedná o mezeru mezi poli a v případě hodnot záporných o přesah. Zadaná hodnota definuje, o kolik se zmenší velikost délky strany polí šachovnice, velikost skutečné mezery je poté dvojnásobná.

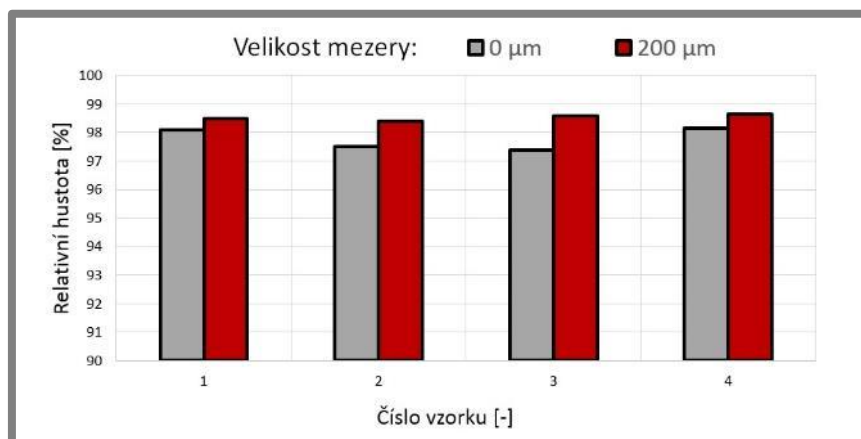
První realizovaná stavba sledovala vliv velikosti mezery mezi poli šachovnice při konstantních parametrech výkonu laseru a skenovací rychlosti. Velikost jednoho pole šachovnice byla 3x3 mm. Mezera byla měněna v rozsahu 0-200 μm .



Obr. 5-28 Graf závislosti relativní hustoty na velikosti mezery mezi poli

Graf (Obr. 5-28) ukazuje závislost velikosti mezery na relativní hustotě vzorku. Se změnou velikosti mezery nebyl pozorován zásadní vliv na výslednou relativní hustotu vzorků.

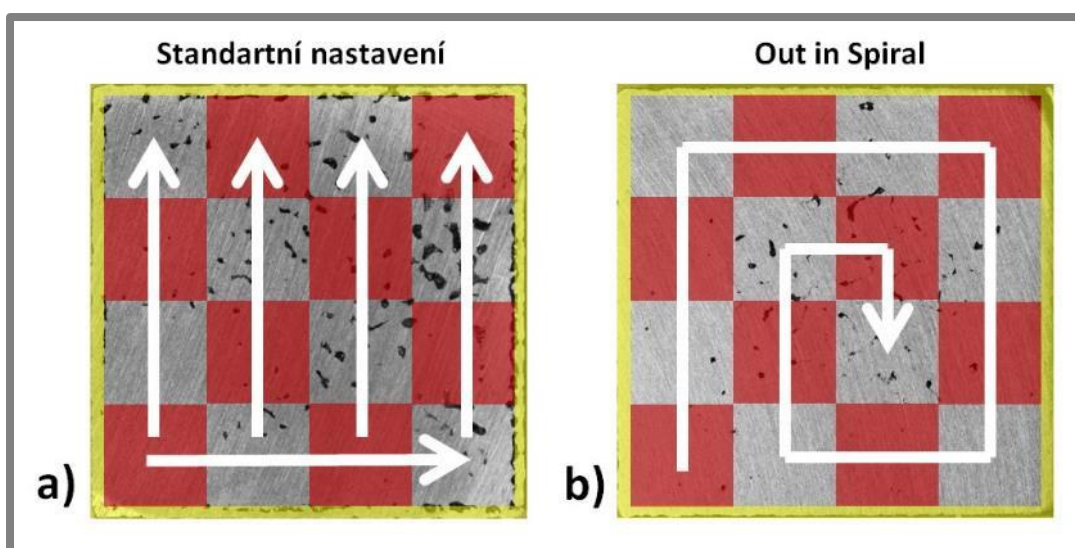
Po prozkoumání vlivu dalších procesních parametrů strategie „Chessboard“, které jsou popsány v následujících kapitolách, byl proveden druhý experiment vlivu velikosti mezery. Byly postaveny čtyři vzorky s nulovou mezerou a čtyři vzorky s mezerou 200 μm . Graf (Obr. 5-29) zobrazuje srovnání těchto vzorků. U všech vzorků s mezerou 200 μm bylo pozorováno navýšení relativní hustoty vzorku oproti vzorkům bez mezery.



Obr. 5-29 Srovnání relativní hustoty vzorků s a bez mezery mezi poli

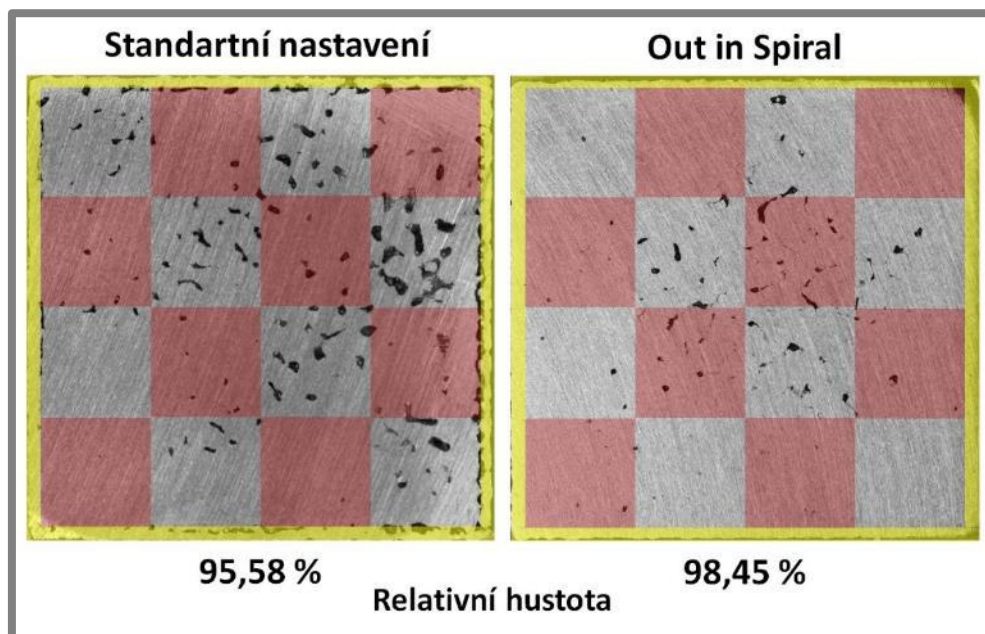
„Out in spiral“

Dalším zkoumaným parametrem skenovací strategie „Chessboard“ je nastavení „Out in spiral“ popřípadě „In out spiral“. Jedná se o změnu pořadí skenování jednotlivých polí šachovnice. U standardního nastavení jsou jednotlivá pole skenována postupně od spodního levého rohu směrem nahoru a doprava (Obr. 5-30a). Nejprve jsou skenována pole označená červeně a poté pole neoznačená. U nastavení „Out in spiral“ jsou jednotlivá pole skenována ve spirále od kraje směrem do středu (Obr. 5-30b). Opět jsou nejprve skenována pole červená a poté neoznačená.



Obr. 5-30 Postup skenování polí strategie „Chessboard“

Obdobně jako u skenovací strategie „Meander“, i u strategie „Chessboard“ vzniká nejvíce pórů v oblastech vzorku, které jsou skenovány jako poslední. V průměru až 75% pórů vzniká v oblasti neoznačených polí šachovnice. Na Obr. 5-31 můžeme vidět, že většina pórů vzniká na posledních čtyřech skenovaných polích.

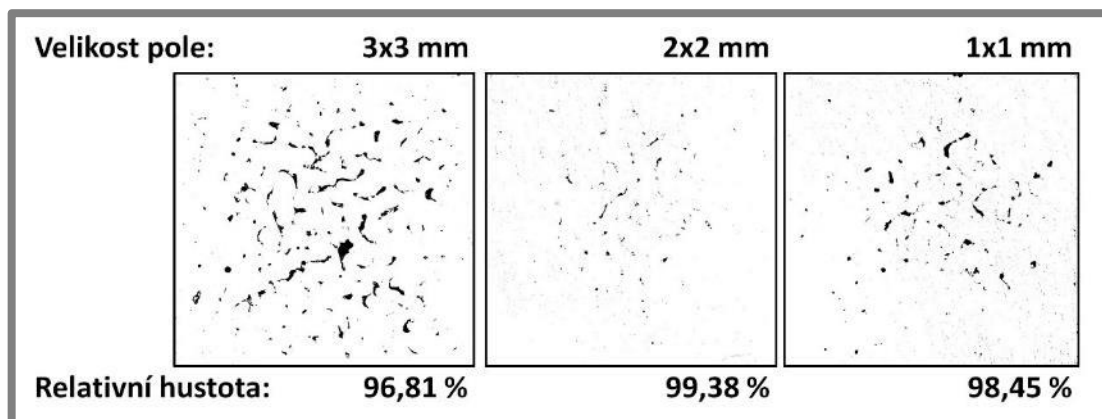


Obr. 5-31 Srovnání běžného postupu skenování s nastavením „Out in spiral“

Při použití nastavení „Out in spiral“ dochází ke snížení celkové porozity vzorku. Výskyt pórů se přesune do středu vzorku, tedy opět do oblasti, jež je skenována jako poslední. Podle tvaru pórů je můžeme na základě rešerše zařadit mezi „keyhole“ póry. Ty jsou způsobeny rychlým tuhnutím taveniny a vyskytují se ve vzorcích s nižší hodnotou objemové hustoty energie.

Velikost pole

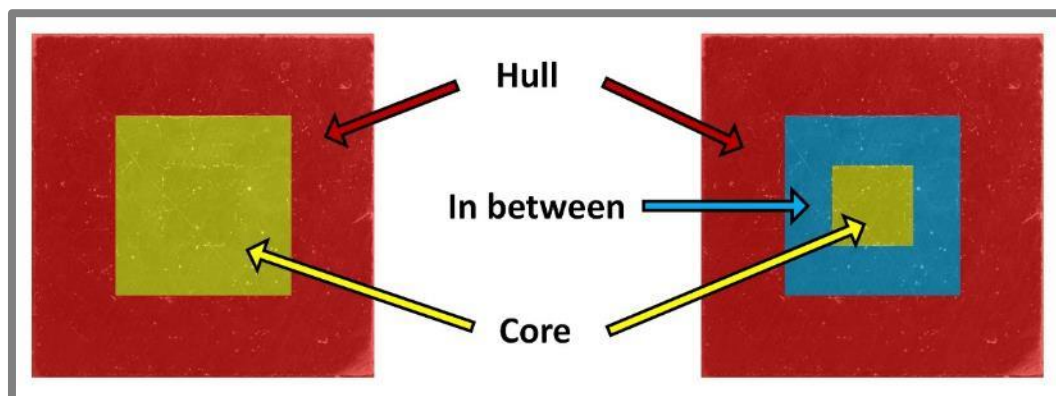
Posledním zkoumaným parametrem u strategie „Chessboard“ byla velikost jednoho pole šachovnice. Bylo vyrobeno několik vzorků se stejnými procesními parametry. Jediná proměnná byla délka strany jednoho pole šachovnice, měněna v rozsahu 1-3 mm. Na Obr. 5-32 můžeme vidět srovnání těchto vzorků. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo pro hodnotu velikosti pole 2x2 mm.



Obr. 5-32 Srovnání vzorků s různou velikostí pole

5.3.3 Strategie „Hull and Core“

Další zkoumanou strategií je „Hull and Core“. Vzorek je rozdělen na dvě oblasti „Hull“ (obal) a „Core“ (jádro). Popřípadě je mezi ně přidána ještě třetí oblast „In between“ (Obr. 5-33). Každá oblast má poté své vlastní nastavení procesních parametrů. Především skenovací rychlosti a výkonu laseru. Skenovací strategie pro všechny oblasti zůstává „Cheesboard“ s velikostí pole 2x2 mm. Celkem bylo s touto strategií realizováno 6 staveb obsahujících 56 vzorků.

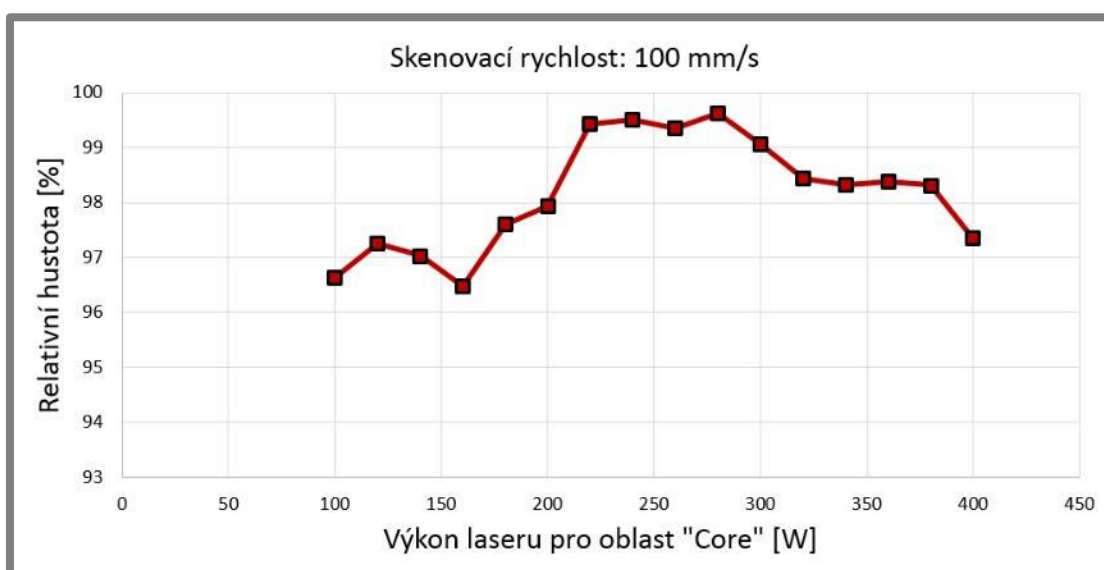


Obr. 5-33 Strategie „Hull and Core“

Vliv výkonu laseru

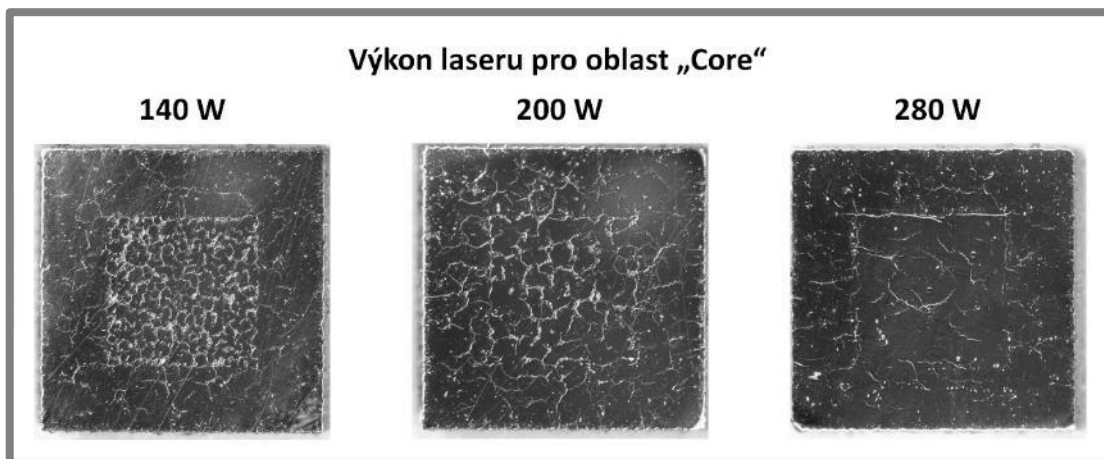
Větší výskyt „keyhole“ pórů ve středu vzorku při použití strategie „Chessboard“ poukazoval na nedostatečnou energii při skenování. Proto byl navržen experiment pro sledování vlivu vstupní energie na porozitu vzorku pro oblast „Core“.

Procesní parametry oblasti „Hull“ byly pro všechny vzorky stejné. Skenovací rychlost 200 mm/s a výkon laseru 200 W. U oblasti „Core“ byla konstantní skenovací rychlost 100 mm/s a výkon laseru byl měněn v rozsahu 100 – 400 W. Hodnota objemové hustoty energie pro oblast „Hull“ byla 180 J/mm³. Pro oblast „Core“ se měnila v závislosti na výkonu laseru v rozsahu 180 – 727 J/mm³.



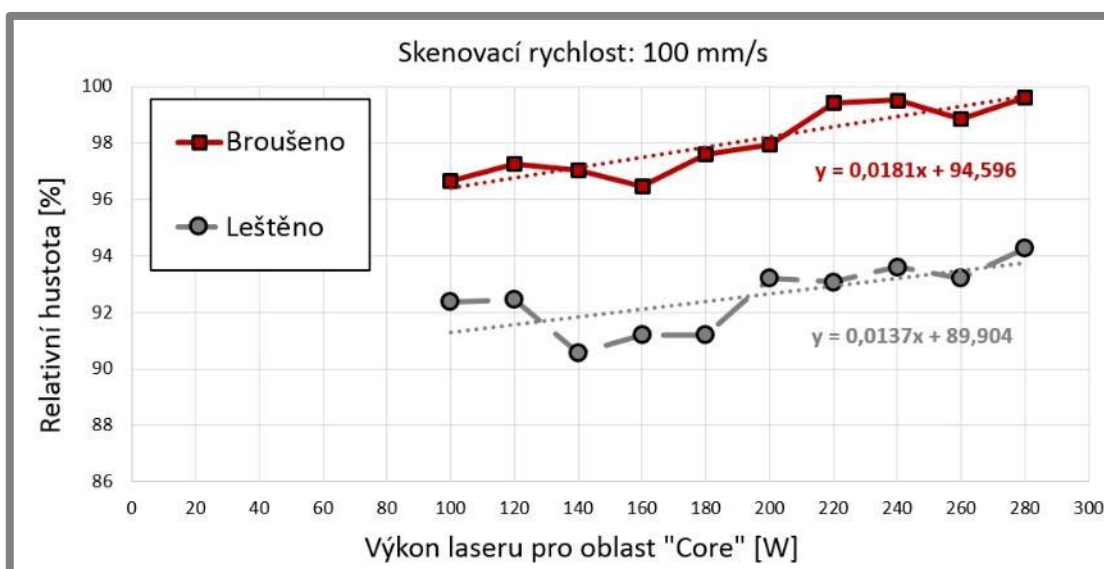
Obr. 5-34 Graf závislosti relativní hustoty vzorku na výkonu laseru

Výsledek experimentu můžeme vidět na Obr. 5-34. Jedná se o závislost relativní hustoty na výkonu laseru pro oblast „Core“. Z grafu je patrné, že nejlepších výsledků bylo dosaženo s výkonem laseru 240-280 W. U těchto vzorků dosahovala relativní hustota hodnot přes 99,5%. V oblasti s nižším výkonem laseru se ve středu vzorku vyskytovaly především „keyhole“ póry. S rostoucím výkonem laseru se tyto vady postupně zmenšovaly a od hodnoty 260 W se začaly ve vzorcích objevovat póry metalurgické (Obr. 5-35).



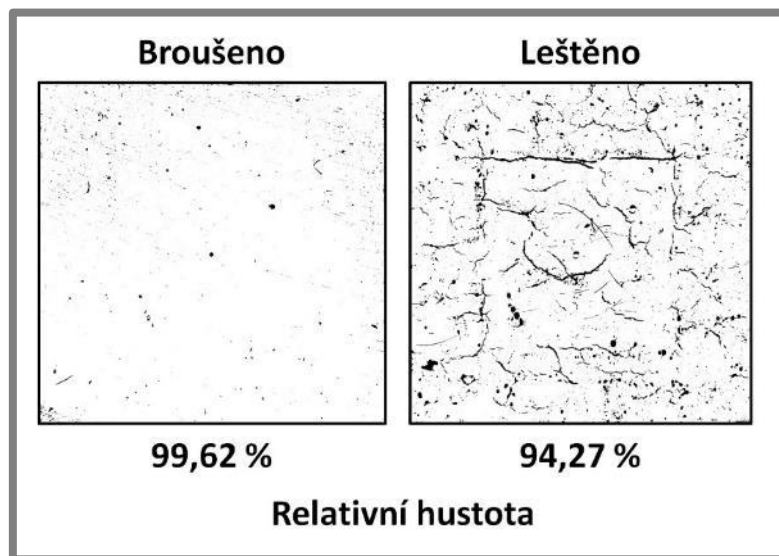
Obr. 5-35 Srovnání vzorků „Hull and Core“

Pro podrobnější prozkoumání vad vzorků, s vysokou relativní hustotou, byly po vybroušení ještě vyleštěny. Srovnání naměřených hodnot relativní hustoty se nachází na Obr. 5-36. Na vyleštěných vzorcích dosahovala naměřená relativní hustota v průměru o 5 % nižších hodnot. Za pomoci metody nejmenších čtverců byly naměřenými hodnotami proloženy přímky. Směrnice těchto přímek jsou téměř totožné. Srovnání snímků se nachází v příloze 6.



Obr. 5-36 Srovnání naměřených relativních hustot pro broušené a leštěné vzorky

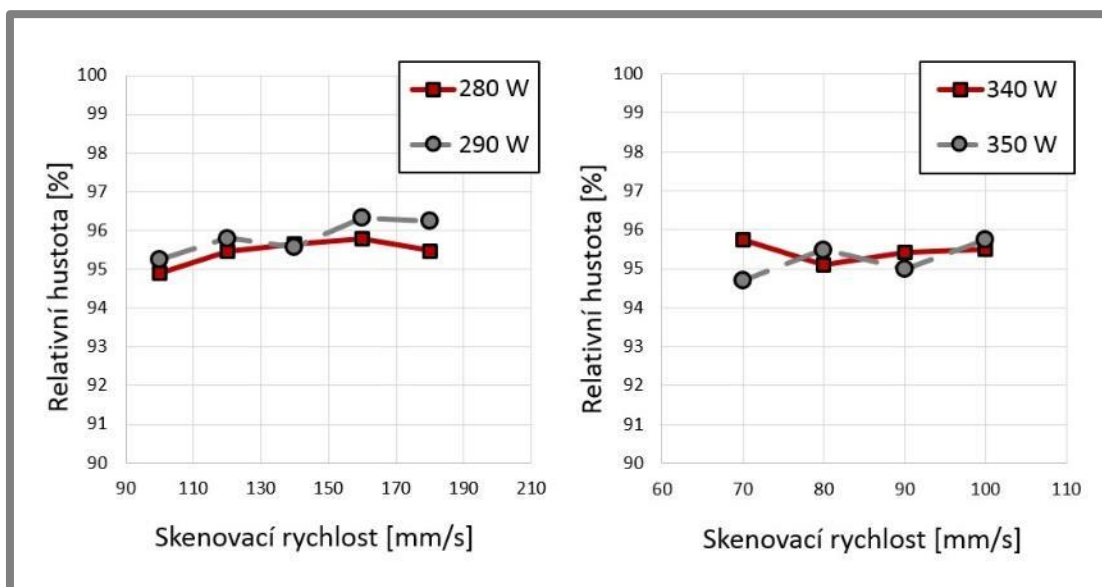
Rozdíl v naměřených relativních hustotách je způsoben především výskytem trhlin ve všech vzorcích. Na Obr. 5-37 je pro srovnání snímek analýzy vybroušeného a vyleštěného vzorku. U vyleštěného vzorku můžeme pozorovat trhliny v oblastech „Hull“ i „Core“ a především na rozhraní mezi nimi.



Obr. 5-37 Srovnání broušeného a leštěného vzorku

Vliv skenovací rychlosti

Další experiment zkoumal vliv skenovací rychlosti na relativní hustotu vzorku. Byly postaveny dvě sady vzorků. První sada podrobněji zkoumala oblast nejlepšího výsledku z minulé stavby. Tedy výkon laseru 280 a 290 W a skenovací rychlost v rozsahu 100-180 mm/s. Druhá sada byla zaměřena na vzorky s vyšší vstupní energií, u kterých byl sledován snížený výskyt trhlin. Výkon laseru 340 a 350 W a skenovací rychlost 70-100 mm/s.

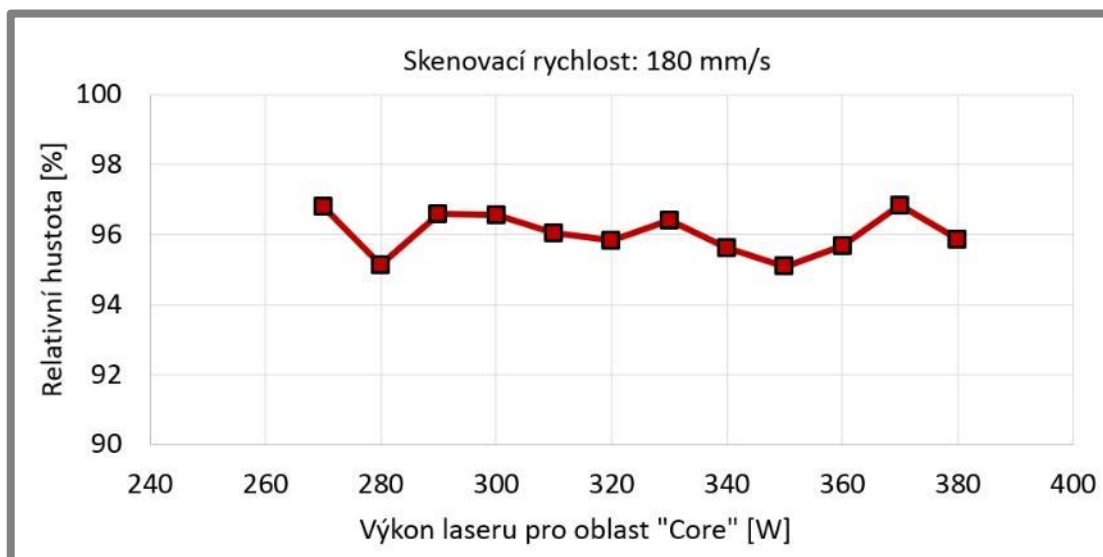


Obr. 5-38 Grafy závislosti relativní hustoty na skenovací rychlosti

Výsledky experimentu můžeme vidět na grafech závislosti relativní hustoty na skenovací rychlosti (Obr. 5-38). U vzorku s vyšší energií nebyla se změnou skenovací rychlosti pozorována změna relativní hustoty. Ve všech těchto vzorcích se vyskytovaly metalurgické póry i trhliny na rozhraní oblastí „Hull“ a „Core“. U vzorku s nižší energií došlo se zvýšením skenovací rychlosti k vymizení metalurgických pórů. Avšak i u těchto vzorků se objevovaly trhliny.

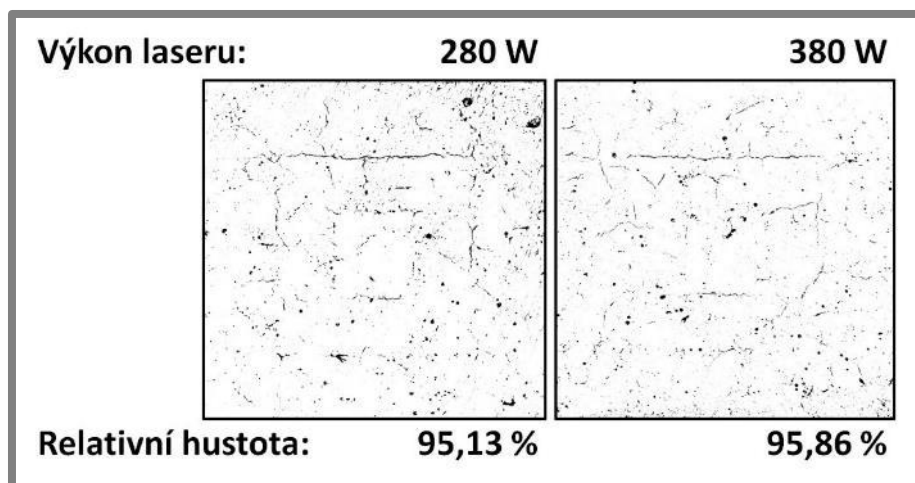
„In between“

Pro jemnější rozložení energie v průběhu stavby vzorku byl rozdělen do tří oblastí. Mezi oblastí „Hull“ a „Core“ přibyla ještě oblast „In between“. Opět byl sledován vliv změny výkonu laseru na relativní hustotu vzorku. Procesní parametry pro oblast „Hull“ zůstaly zachovány. Pro oblast „In between“ byly použity hodnoty výkonu laseru 290 W a skenovací rychlosti 180 mm/s. Tedy parametry doposud nejlepšího výsledku. Pro oblast „Core“ byla zachována hodnota skenovací rychlosti 180 mm/s a výkon laseru byl měněn v rozsahu 250-380 W.



Obr. 5-39 Závislost relativní hustoty na výkonu laseru

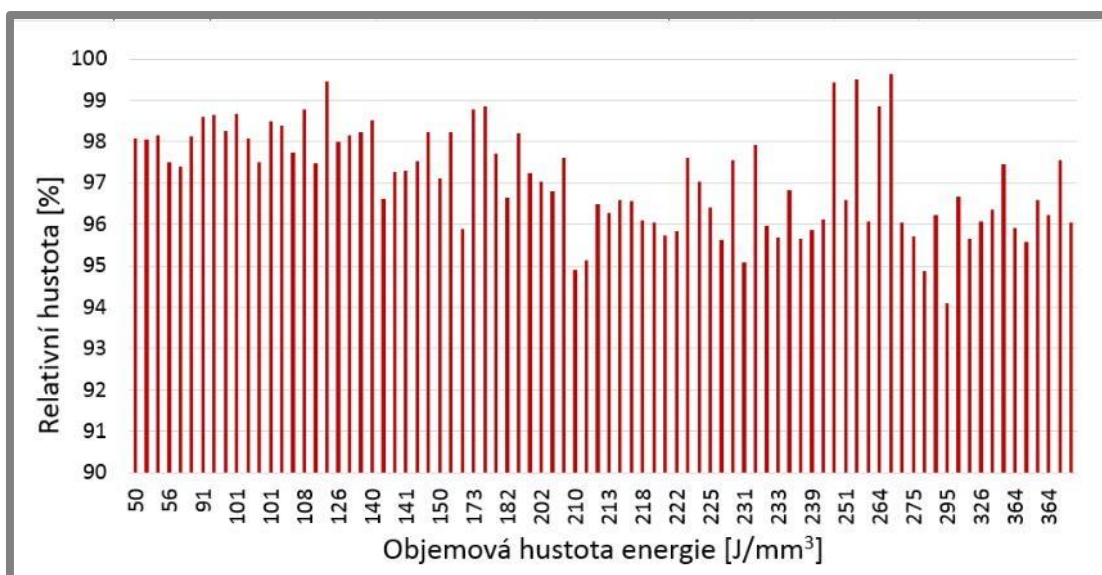
Z grafu (Obr. 5-39) je patrné, že se změnou výkonu laseru nedochází ke změně relativní hustoty vzorku. Pozvolnější změnou objemové hustoty energie mezi oblastmi „Hull“ a „Core“ bylo docíleno zredukování výskytu metalurgických i „keyhole“ pórů. Vyšší naměřena porozita vzorku je způsobena velkým výskytem trhlín ve vzorku. Dochází k jejich tvorbě převážně v přechodu mezi jednotlivými oblastmi (Obr. 5-40). S rostoucí výkonem a tedy i vstupní energií dochází k úbytku trhlín a přechod mezi oblastmi není tak patrný.



Obr. 5-40 Výskyt trhlin na hraních oblastí

Objemová hustota energie

Ze všech doposud získaných výsledků byl sestaven graf závislosti relativní hustoty na objemové hustotě energie (Obr. 5-41). Pro srovnání vzorků se strategií „Chessboard“ a „Hull and Core“ byla objemová hustota energie přepočítána na základě procentuálního zastoupení jednotlivých oblastí v celém vzorku.



Obr. 5-41 Graf závislosti relativní hustoty na objemové hustotě energie

Obdobně jako u *Ahuja* [8] a *Koutný* [9] nebyla nalezena korelace mezi hustotou energie a výslednou relativní hustotou vzorku. U vzorků s objemovou hustotou energie 50 J/mm^3 byla naměřena obdobná relativní hustota jako u vzorků s hustotou energie 300 J/mm^3 .

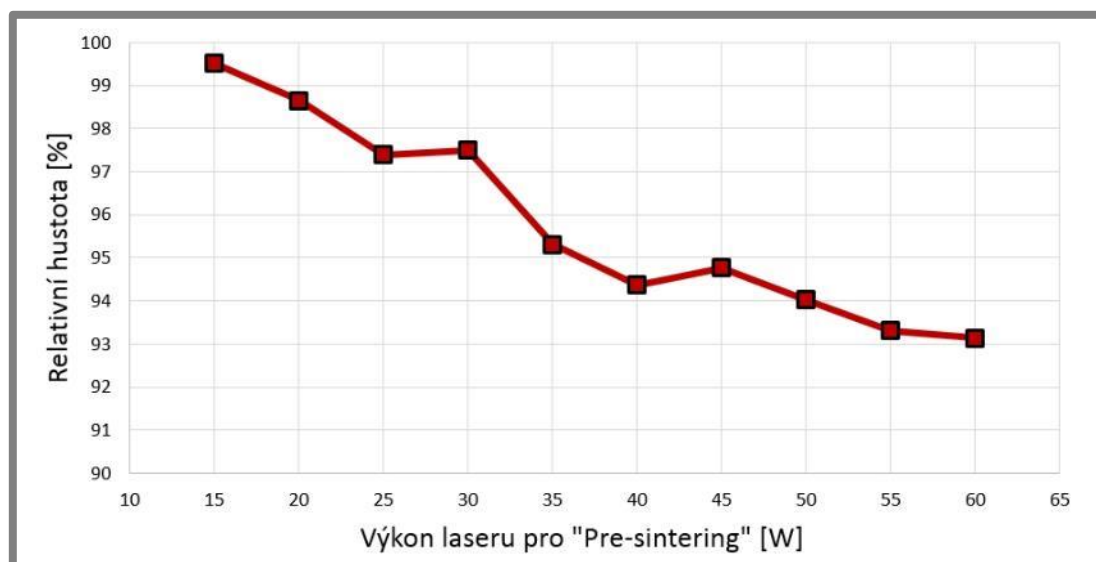
Pomocí strategie „Chessboard“ a rozdělení vzorku na oblasti „Hull and Core“ se podařilo výskyt porozity ve vzorku. Bylo docíleno relativní hustoty 99,63 %. Pokud jsou však započítány do vyhodnocení relativní hustoty i trhliny je tato hodnota snížena až o 4%. Výskyt trhlin byl pozorován u všech vzorků, proto další část diplomové práce bude zaměřená na redukci jejich výskytu.

5.3.4 Strategie „Pre-sintering“

Aboulkhair [3] zkoumal vliv skenovacích strategií na porozitu vzorku pro slitinu AlSi10Mg. Nejlepšího výsledky bylo docíleno se skenovací strategií nazvanou „Pre-sintering“. Z toho důvodu byl proveden experiment pro zjištění vlivu této skenovací strategie na porozitu vzorku i pro slitinu AW 2618.

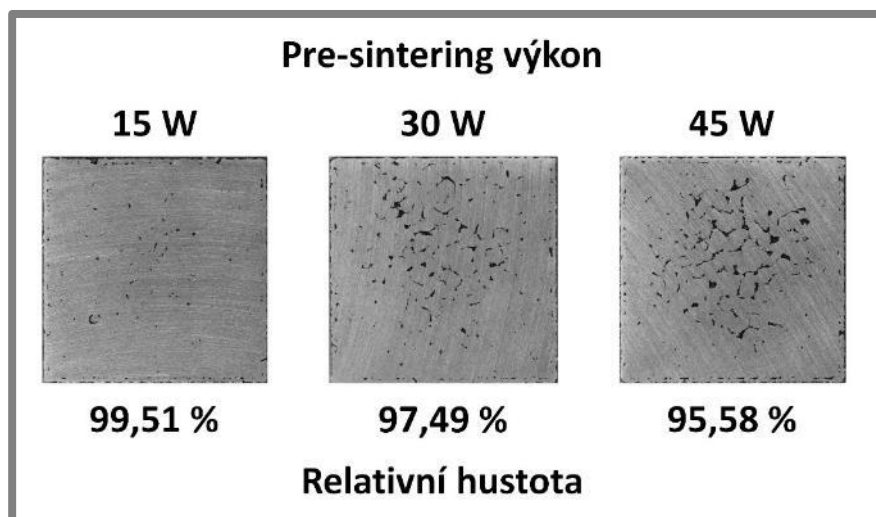
U této strategie je vzorek v jedné vrstvě skenován dvakrát. Poprvé je skenován s nižším výkonem, kdy dojde pouze ke spečení (sintering) práškového materiálu. Poté je skenován znovu s vyšším výkonem. V tomto případě již dojde ke kompletnímu natavení (melting) práškového materiálu.

Celkem byly realizovány 2 stavby s 20 vzorky. Pro samotné skenování byla použita strategie „Chessboard“ s velikosti pole 2x2 mm. Výkon laseru byl 200 W a skenovací rychlost 200 mm/s. Výkon pro „Pre-sintering“ byl měněn v rozsahu 15-60 W. Výsledky experimentu můžeme vidět na grafu (Obr. 5-42)



Obr. 5-42 Graf závislosti relativní hustoty na výkonu laseru pro „Pre-sintering“

Výsledky ukazují, že s rostoucím výkonem laseru pro „Pre-sintering“ značně klesá relativní hustota vzorku. Strategie „Pre-sintering“ tedy nemá pozitivní vliv na hustotu materiálu. Vzorky bez použití této strategie vykazují lepší relativní hustotu. Srovnání můžeme vidět na Obr. 5-43. Ze srovnání je patrné že s rostoucím výkonem přibývá množství „keyhole“ pórů ve středu vzorku. Přehled všech snímků se nachází v příloze 7.



Obr. 5-43 Srovnání vzorků „Pre-sintering“ experimentu

5.3.5 Vzorky na podpůrné struktuře

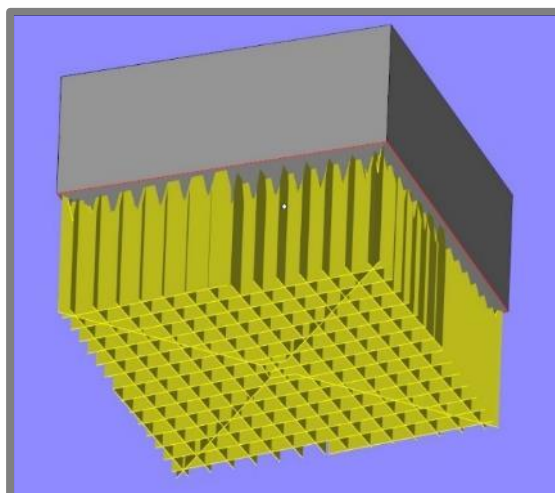
5.3.5

Z rešerše vyplývá, že objemové vzorky stavěné na podporách dosahují vyšší relativní hustoty než vzorky se stejnými parametry bez podpor. Tento jev byl pro slitinu AW 2618, již dříve na Ústavu konstruování zkoumán, avšak nebyl pozorován rozdíl mezi vzorky s a bez podpůrných struktur. Vliv podpůrných struktur na kvalitu vzorku byl znovu otestován pro větší objemové vzorky.

Návrh podpor vycházel ze studie současného stavu poznání, především ze článku [15]. Při návrhu byla snaha co nejvíce omezit kontaktní plochu mezi vzorkem a tím minimalizovat odvod tepla ze vzorku v průběhu stavby. Zároveň však musí být podpory dostatečně pevné, aby nedošlo k utržení celého vzorku od platformy.

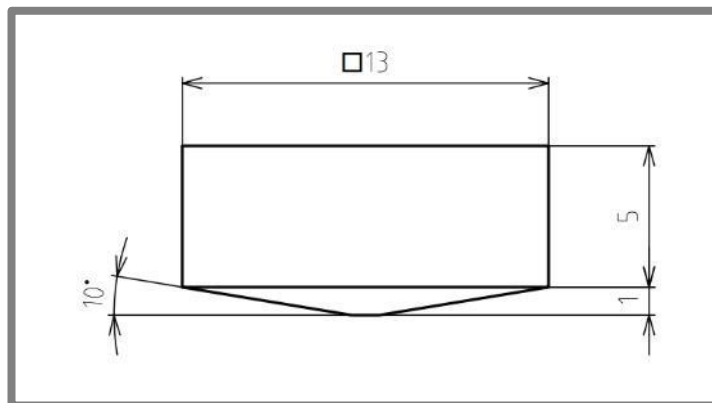
Nastavení podpor

Samotné podpory byly vytvořeny v programu Materialise Magics za použití modulu „Support generation“. Byly použity podpory typu „Block“ (Obr. 5-44). Zkoumaným parametrem bylo nastavení „Hatching“. Jedná se o velikost mezer mřížky blokových podpor.



Obr. 5-44 Blokové podpory

Objemový vzorek pro stavbu na podporách byl oproti běžným kostkám upraven dle Obr. 5-45. Na podstavu kostky byl připevněn komolý jehlan o výšce 1 mm. Slouží k tomu, aby nedošlo k prudkému přechodu mezi stavbou podpor a stavbou objemu v jedné vrstvě. Místo toho dochází k plynulému přechodu během 20 vrstev stavby, díky čemuž je proces stavby stabilnější.

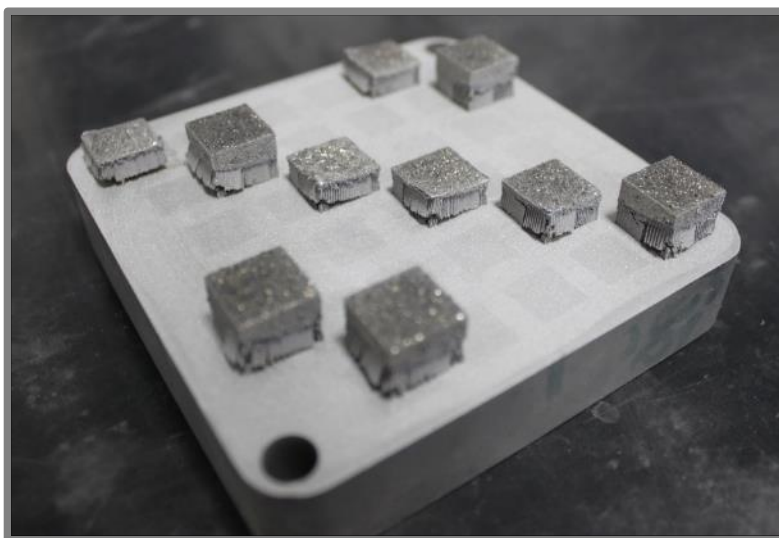


Obr. 5-45 Výkres objemového vzorku pro podpůrné struktury

První stavba

Pro optimalizaci parametru „Hatching“ byla navržena první stavba na podporách. Jeho hodnota se pohybovala v rozsahu 0,3 až 1,1 mm. Parametry pro stavbu podpor byly určeny dle [17]. Výkon laseru 400 W a skenovací rychlost 1400 mm/s. Procesní parametry pro objemové vzorky byly pro všechny stejné, a to výkon laseru 200 W a skenovací rychlost 200 mm/s. Byla použita skenovací strategie meandr, s natočením směru skenování 79°.

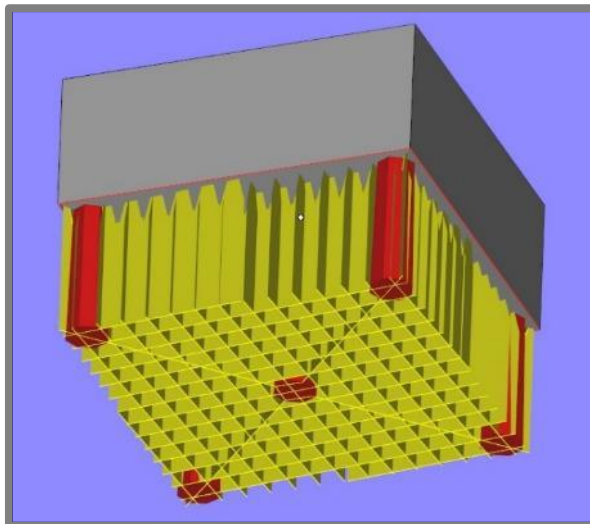
Během stavby se ukázalo, že navržené podpory nejsou dostatečně pevné. V důsledku vnitřního napětí ve vzorcích došlo k jejich oddělení do platformy. Výsledek stavby můžeme vidět na Obr. 5-46. K odtržení části podpor od platformy došlo v případě všech deseti vzorků. Stavba pěti vzorků musela být předčasně zastavena a jeden vzorek se od platformy oddělil úplně. Nejmenší deformace podpor můžeme sledovat u vzorku s hodnotou „hatching“ 0,9 mm.



Obr. 5-46 První stavba s podpůrnou strukturou

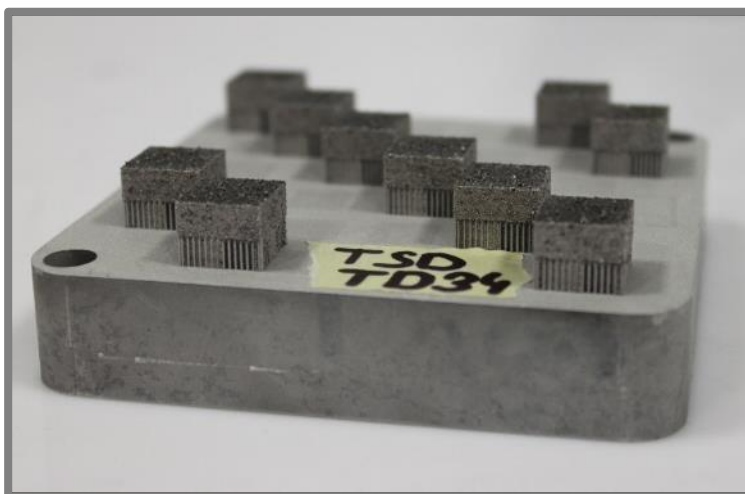
Druhá stavba

Pro zvýšení tuhosti podpůrné struktury byly u druhé stavby přidány podpory typu „Cone“. Na Obr. 5-47 označeny červeně. Jedná se o komolé kužely s poloměrem podstav 0,7 a 0,8 mm v kontaktu se vzorkem a platformou.



Obr. 5-47 Podpory typu „Cone“

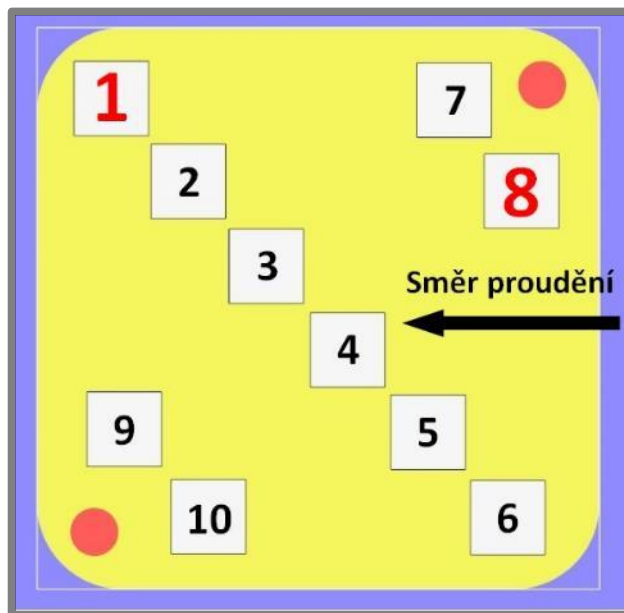
U této stavby byla hodnota velikosti mezer mřížky („hatching“) u všech vzorků 0,9 mm. Zkoumaným parametrem byla skenovací rychlost podpůrných struktur. Ta byla měněna v rozsahu 1000 až 1400 mm/s. Procesní parametry objemových vzorků byly zachovány z předchozí stavby.



Obr. 5-48 Druhá stavba s podpůrnou strukturou

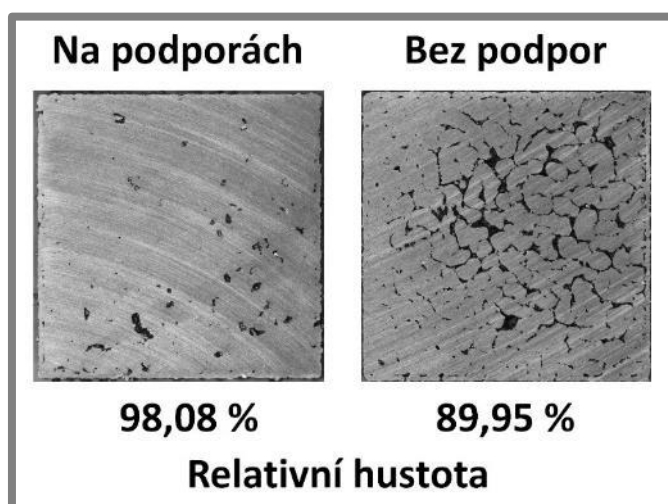
Jak můžeme vidět na Obr. 5-48, zesílení tuhosti podpůrných struktur mělo pozitivní vliv na průběh stavby. Nedošlo k narušení podpor ani u jednoho ze vzorků.

Nejlepšího výsledku bylo docíleno se skenovací rychlostí 1400 mm/s. S touto rychlostí se ve stavbě vyskytovaly dva vzorky. Jejich pozice na stavební platformě je vyznačena na Obr. 5-49. U vzorku č. 8, který se nachází nejbližší ke vstupu proudění atmosféry, byla naměřena výsledná porozita 4,5 %. Naopak u vzorku č. 1, který je od vstupu atmosféry nejdál, byla naměřena porozita přes 7,8 %.



Obr. 5-49 Umístění vzorků na platformě

Obr. 5-50 ukazuje srovnání výbrusu dvou vzorků, které mají stejné procesní parametry. Výkon laseru 200 W, skenovací rychlost 200 mm/s a skenovací strategii „Meander“ 79°. Vzorek vlevo byl stavěn na podporách, zato vzorek vpravo byl stavěn přímo na stavební platformu. Rozdíl v naměřené relativní hustotě mezi nimi byl téměř 8 %. Z toho vyplývá, že snížení odvodu tepla z objemového vzorku, za pomoci podpůrných struktur, má pozitivní vliv na výslednou relativní hustotu vzorku.

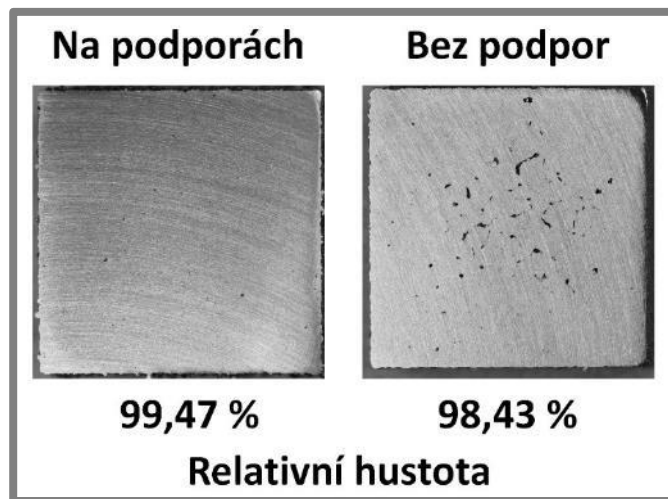


Obr. 5-50 Srovnání vzorků na podpůrných strukturách „Meander“

Třetí a čtvrtá stavba

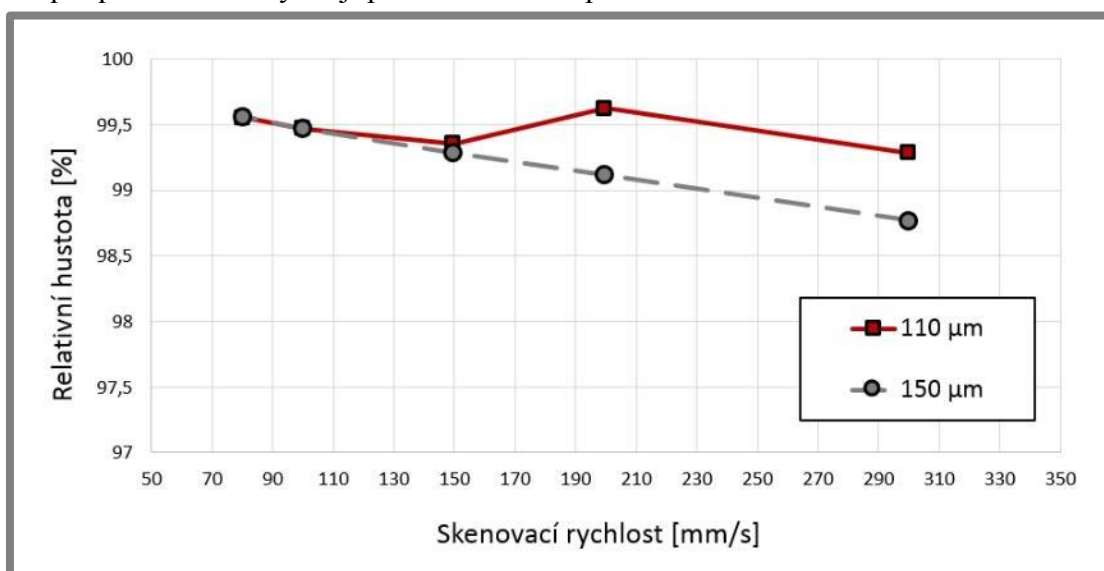
Na základě výsledků předchozího experimentu byly navrženy další dvě stavby pro ověření vlivu podpůrných struktur na výslednou kvalitu vzorku i u dalších skenovacích strategií.

Třetí stavba zkoumala vliv podpor při použití strategie „Chessboard“. Byla zachována velikost jednoho pole 2x2 mm. Výkon laseru byl u všech vzorků konstantní, 200 W. Mezi zkoumané parametry patří skenovací rychlost, měněna v rozsahu 80-300 mms/ a šrafovací vzdálenost byla volena 110 a 150 μm .



Obr. 5-51 Srovnání vzorků na podpůrných strukturách „Chessboard“

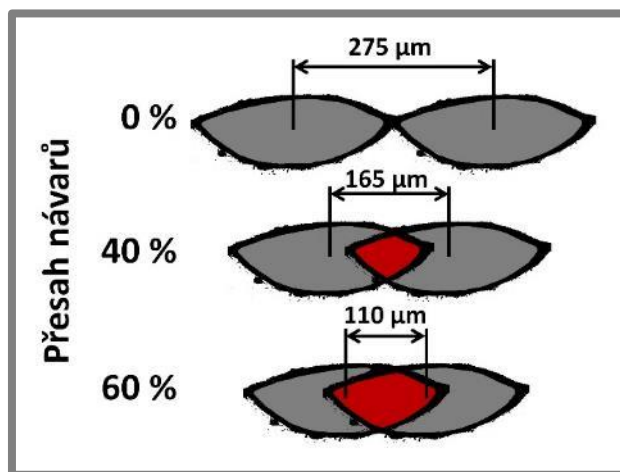
U skenovací strategie „Chessboard“ už není vliv podpůrných struktur tak značný (Obr. 5-51). Rozdíl v naměřených relativních hustotách je přibližně 1 %. Stále je však vidět, že podpůrné struktury mají pozitivní vliv na porozitu vzorku.



Obr. 5-52 Graf závislosti relativní hustoty na skenovací rychlosti pro různé šrafovací vzdálenosti

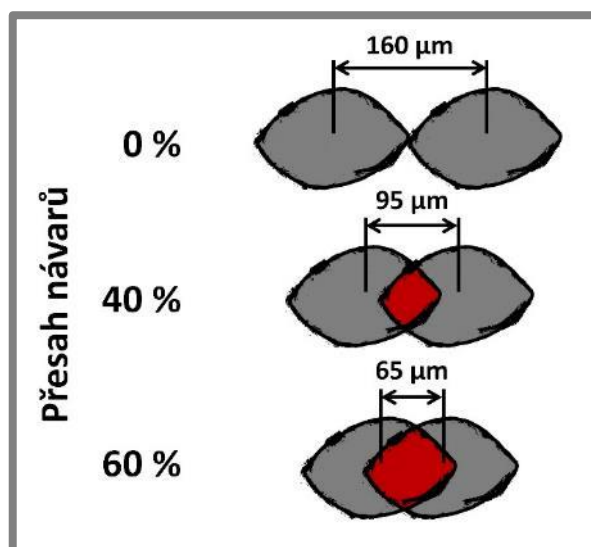
Graf (Obr. 5-52) zobrazuje srovnání naměřených hodnot relativní hustoty pro šrafovací vzdálenosti 110 a 150 μm . Vyšší relativní hustoty byly dosaženy pro

šrafovací vzdálenost 110 μm . S klesající skenovací rychlostí se výsledky pro obě šrafovací vzdálenosti srovnávají. Je to způsobeno tím, že při klesající skenovací rychlosti narůstá šířka jednotlivých návarů laseru. Zatímco pro šrafovací vzdálenost 110 μm je přesah jednotlivých drah 60 % již při rychlosti 300 mm/s, pro šrafovací vzdálenost 150 μm dochází k 60% přesahu až při rychlosti 150 mm/s. Na Obr. 5-53 je znázorněn přesah návarů pro různé hodnoty šrafovací vzdálenosti, kde obrysový tvar návaru byl získán analýzou obrazu z reálných snímků.



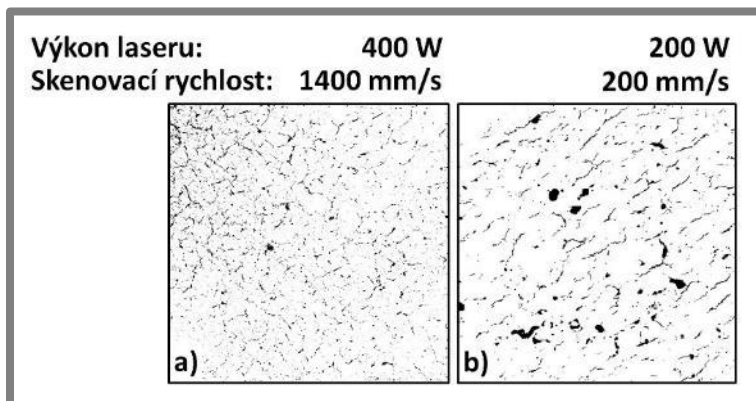
Obr. 5-53 Znázornění přesahu návarů (nízké rychlosti)

U čtvrté stavby byla prozkoumaná oblast vyšších skenovacích rychlostí, která byla objevena pomocí návarových experimentů. Byla použita strategie „Meander“ 79°, výkon laseru 400 W, skenovací rychlost 1300-1400 mm/s. Hodnoty šrafovací vzdálenosti byly voleny na základě šířek daných návarů v rozsahu 60-100 μm . V tomto intervalu dochází překryvu jednotlivých drah laseru o 40-60 %. Znázornění procentuálního překrytí návaru je zobrazeno na Obr. 5-54.



Obr. 5-54 Znázornění přesahů návarů (vysoké rychlosti)

U žádného ze vzorků nebyl pozorován zvýšený výskyt pórů. Naměřená relativní hustota u všech vzorků se pohybovala nad 99 %. To potvrzuje výsledky návarových experimentů, kde návary v této procesní oblasti vykazovaly ideální tvar pro SLM proces.



Obr. 5-55 a) Trhliny se šíří všemi směry b) Trhliny se šíří jedním směrem

Po vyleštění vzorků byly v celém průřezu pozorovány trhliny (Obr. 5-55a). Jedná se o hustou síť drobných trhlín, které se šíří všemi směry. Rozdílné chování můžeme pozorovat u vzorku s nižší skenovací rychlostí (Obr. 5-55b). V tomto případě jsou trhliny širší a dochází k jednoznačnému šíření ve směru diagonály vzorku. Při porovnání dané výšky vzorku s výrobními daty se ukázalo, že směr šíření trhlín může odpovídat směru skenování. Nelze to však jednoznačně určit jelikož dochází ke změně směru skenování v každé vrstvě.

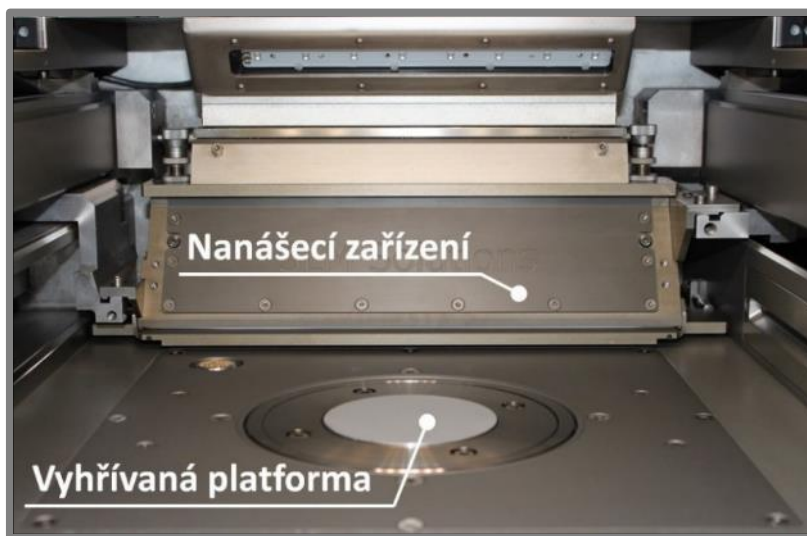
5.3.6 Experiment za zvýšené teploty

5.3.6

Poslední experiment byl zaměřen na vzorky postavené se zvýšeným výhřevem stavební platformy. Tento experiment proběhl ve spolupráci s Technickou univerzitou Graz, na jejíž půdě byl také realizován. Tamější Ústav strojírenské technologie disponuje modernizovanou verzí výrobního zařízení SLM 280HL. Dále má k dispozici také vysokoteplotní vyhřívanou jednotku, která je schopna nahřát stavební platformu až na teplotu 550 °C [18]. U tohoto experimentu byla snaha o redukování teplotního rozdílu mezi tavnou lázní a zbytkem vzorku a také o snížení odvodu tepla ze vzorku. Díky tomu by mohlo dojít k redukcí vzniku trhlín ve vzorku.

Vysokoteplotní vyhřívána jednotka

Na (Obr. 5-56) můžeme vidět stavební komoru novější verze zařízení SLM 280HL s namontovanou vysokoteplotní vyhřívanou jednotkou. Je osazena novým nanášecím zařízením, které je čistě mechanické a nevyžaduje pro dávkování prášku řízené drážkované hřídele. Nanášecí zařízení nemá ani zásobník na práškový materiál, místo toho je po každém přejezdu dopředu a zpět doplněn nový prášek přímo z hlavního zásobníku. Při použití vysokoteplotní vyhřívané jednotky se pro nanesení vrstvy prášku používá keramický břit, který je na rozdíl od břitu gumového schopen odolat vyšším teplotám.



Obr. 5-56 Stavební komora s vysokoteplotní jednotkou

Konstrukce vysokoteplotní vyhřívané jednotky je podobná jako u sestavy pro menší stavební platformu. S tím rozdílem, že na redukční sloupec jsou přidány topné patrony, teplotní čidlo je posunuto blíže ke stavební platformě a jsou použity materiály schopné odolat zvýšeným teplotám. Výrobce jednotky, firma SLM Solutions, dodává stavební platformy vyrobeny z titanové slitiny. Pro experimenty s hliníkovým materiálem bylo potřeba vyrobít platformy vlastní. Jako materiál byla použita hliníková slitina EN AW 5083. Jedná se o stejný materiál, jako je použit na malé stavební platformy používané v předchozích experimentech.

Nastavení experimentu

Experiment obsahoval čtrnáct vzorků, jejichž procesní parametry byly vybrány na základě výsledků všech předešlých experimentů. Obsahoval vzorky se skenovací strategií „Meander“ i „Chessboard“, pro širší prozkoumání vlivu výhřevu platformy na různé skenovací strategie. Kompletní seznam vzorků a jejich procesních parametrů se nachází v příloze 8. Na rozdíl od všech ostatních experimentů byl pro zaplavení stavební komory použit argon. Dle Dai [19], argonová atmosféra stabilizuje tavnou lázeň a díky tomu má pozitivní vliv na kvalitu povrchu vzorku a také redukuje výskyt „keyhole“ pórů.

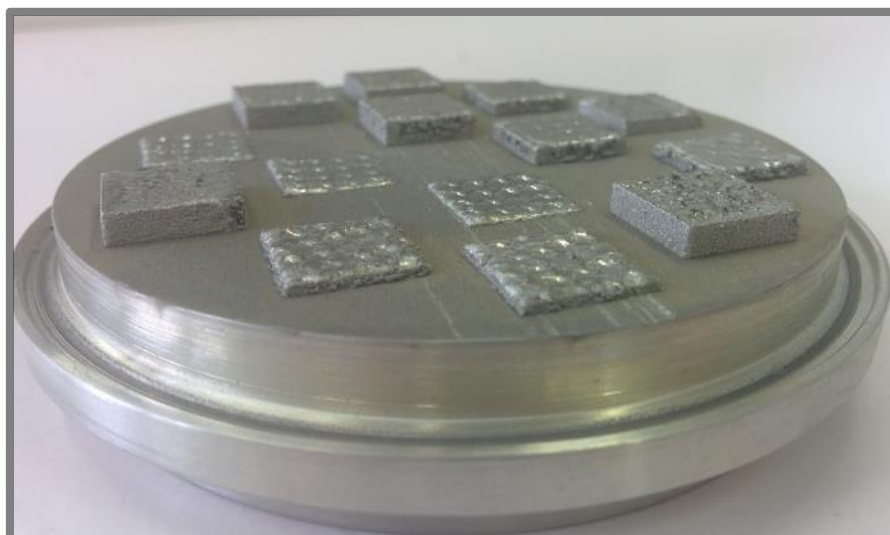
Platforma byla vyhřívána na teplotu 400 °C, jelikož podle [20] se žíhací teplota pro materiál platformy pohybuje okolo teploty 413 °C. 30 minut po dosažení nastavené teploty na teplotním čidlu bylo provedeno měření teploty povrchu platformy pomocí dvou nezávislých měřicích zařízení. Naměřené hodnoty byly 398 °C a 394°C.

Na rozdíl od menší stavební platformy se teplota čidla u vysokoteplotní vyhřívané jednotky shoduje s reálně naměřenou teplotou povrchu platformy.

Původně byly naplánovány dva experimenty se stejnými procesními parametry vzorků. Jeden by byl postaven přímo na platformu a u druhého by byly použity podpůrné struktury. Pro sledování vlivu výhřevu na obojí umístění vzorků. V softwaru výrobního zařízení však byla chyba, která neumožňovala spuštění stavby s vysokoteplotní vyhřívanou jednotkou. Chyba byla opravena až zásahem technika firmy SLM Solutions. Kvůli ztracenému času již nebylo možné realizovat obě stavby. Byla tedy realizována pouze stavba s přímým umístěním vzorků na platformě.

Analýza povrchu vzorku

Výsledek experimentu můžeme vidět na Obr. 5-57. Během stavby se vyskytl problém s vystupováním vzorků nad úroveň nanášené vrstvy. Stavba většiny vzorků musela být zastavena, aby nedošlo k poškození bříty. Keramický břit na rozdíl od gumového není tak poddajný a při naražení do vzorku může dojít k jeho poškození. Z celkových čtrnácti vzorků bylo do požadované výšky postavenou pouze pět.

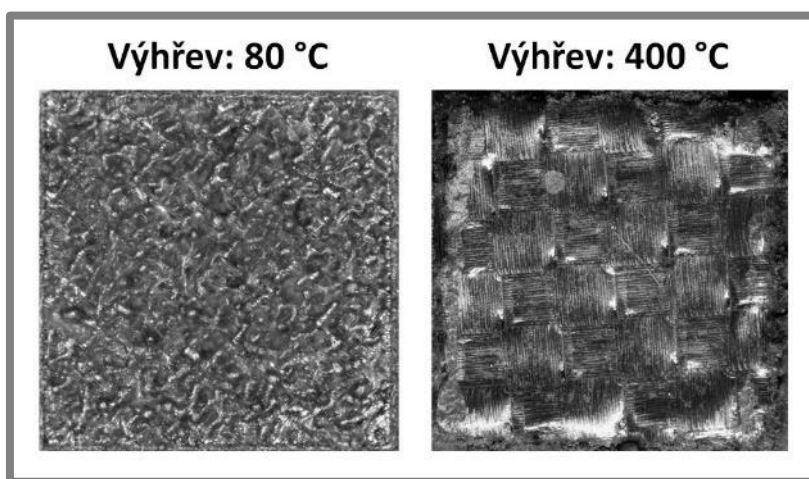


Obr. 5-57 Výsledek experimentu s výhřevem platformy na 400 °C

Jak již bylo popsáno, povrch vzorku je velice hrubý a nepravidelný. Při tomto experimentu však docházelo ke zvedání rohů vzorku. Tento jev zatím nebyl u žádného předchozího experimentu s většími objemovými vzorky pozorován. Nejpatrnější byl u vzorků se strategií „Chessboard“. Sedm z devíti vzorků, které byly během stavby zastaveny, patřily ke vzorkům strategie „Chessboard“. Yasa [23] ve své práci popisuje obdobné chování strategie „Chessboard“ pro materiály 316L a Ti6Al4V.

Na Obr. 5-58 se nachází srovnání povrchu dvou vzorků se stejnými procesními parametry. Vzorek vlevo byl postaven na podpůrné struktuře s běžným výhřevem platformy 80 °C a vzorek vpravo byl postaven se zvýšeným výhřevem platformy 400 °C. Vzorek vlevo má mnohem drsnější povrch s viditelnými výstupky materiálu a občasným výskytem „Balling“ efektu. U vzorku napravo můžeme pozorovat viditelné dráhy laseru po skenování a také vzor strategie „Chessboard“. Povrch je oproti druhému vzorku hladší. Dochází však vyzvednutí celé kontury vzorku. Již z toho srovnání povrchů je patrné, že pro zpracování vzorků s vyhřívanou platformou je potřeba méně vstupní energie, než u vzorků bez výhřevu.

Pro další analýzu byly vzorky ponechány na stavební platformě a postupně byly odbrušovány a následně vyleštěny. Celkem se podařilo analyzovat devět vzorků. Zbylé vzorky neměly dostatečnou výšku pro provedení metalografického výbrusu.



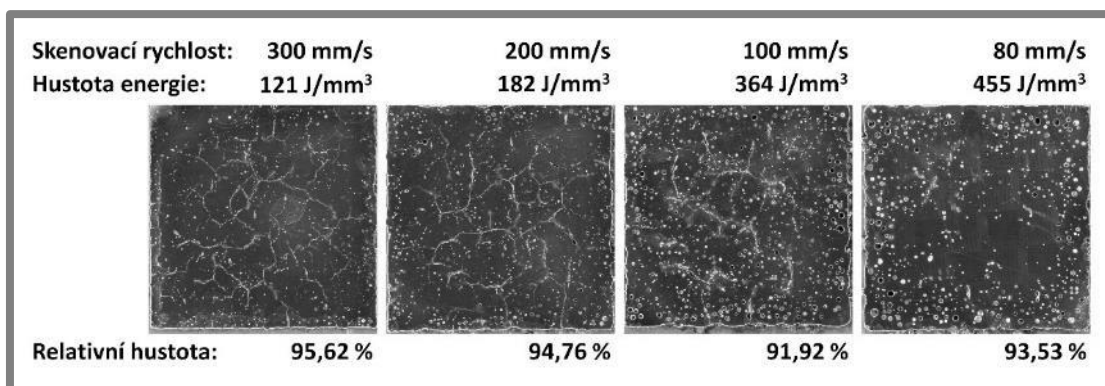
Obr. 5-58 Srovnání povrchu vzorků s různou teplotou výhřevu

Výsledky můžeme rozdělit do dvou oblastí, kde každá má dvě podoblasti:

1. Strategie „Chessboard“
 - a. Nízké skenovací rychlosti (80-300 mm/s)
 - b. Vysoké skenovací rychlosti (1300-1400 mm/s)
2. Strategie „Meander“
 - a. Nízké skenovací rychlosti (100-300 mm/s)
 - b. Vysoké skenovací rychlosti (1300-1400 mm/s)

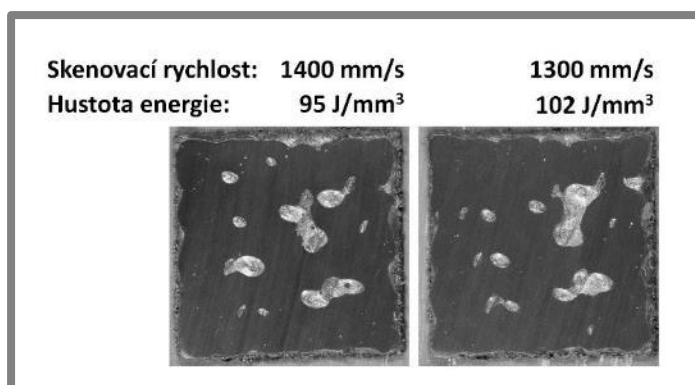
Strategie „Chessboard“

Na Obr. 5-59 se nachází srovnání snímků strategie „Chessboard“ se skenovacími rychlostmi 80-300 mm/s, za konstantního výkonu laseru 200 W. Je patrné, že s klesající skenovací rychlostí a rostoucí objemovou hustotou energie ve vzorku postupně ubývají trhliny. U posledního vzorku, se skenovací rychlostí 80 mm/s, již nebyly pozorovány žádné trhliny. Spolu s ubýváním trhlín však prudce narůstá počet metalurgických pórů. Tyto póry se vyskytují především na okrajích vzorku, v místech, které jsou skenovány jako první. Při srovnání se vzorkem, který byl stavěn s běžným výhřevem platformy a obdobnou hodnotou hustoty energie je počet a velikost těchto pórů mnohonásobně vyšší.



Obr. 5-59 Srovnání vzorků strategie „Chessboard“ (80-300 mm/s)

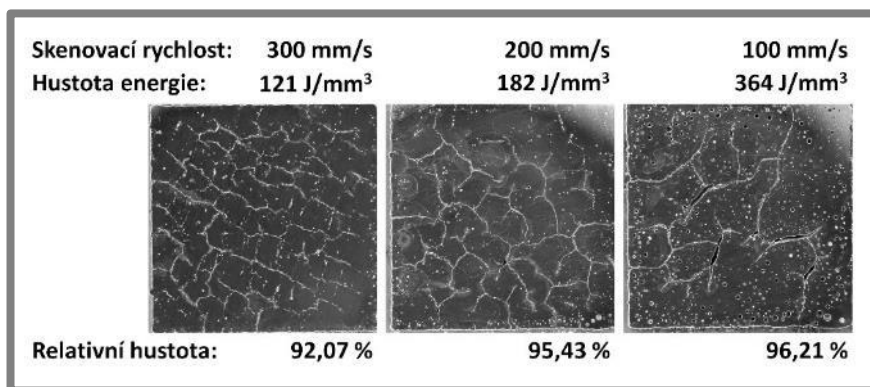
Vzorky s vyššími skenovacími rychlostmi (1300-1400 mm/s), byly předčasně zastaveny ve výšce 0,8 mm. Při broušení ostatních vzorků došlo k jejich probroušení přibližně 0,1 mm pod povrch (Obr. 5-60). V této hloubce nebyly ve vzorcích pozorovány žádné trhliny nebo jiné vady. Tento jev může být způsoben nedostatečnou hloubkou výbrusu nebo malou výškou postaveného vzorku. Aby nedošlo ke zničení ostatních vzorků, nebyl proveden hlubší výbrus pro jejich podrobnější prozkoumání.



Obr. 5-60 Srovnání vzorků strategie „Chessboard“ (1300-1400 mm/s)

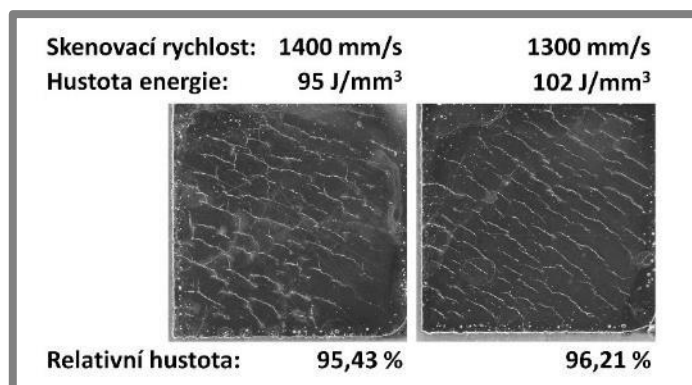
Strategie „Meander“

Vzorky se strategií „Meander“ s nižší skenovací rychlostí (Obr. 5-61) vykazují podobné chování jako u strategie „Chessboard“. S klesající skenovací rychlostí se začínají objevovat metalurgické póry, avšak nedochází k vymizení trhlin. Množství trhlin sice ubývá, ale jejich šířka se zvětšuje, až dochází ke vzniku pórů.



Obr. 5-61 Srovnání vzorků strategie „Meander“ (100-300 mm/s)

U vzorků s vyššími skenovacími rychlostmi (Obr. 5-62) se metalurgické póry vyskytovaly jen minimálně a to v oblasti kontury. Trhliny jsou drobné a zřetelně se šíří jedním směrem. A to ve směru diagonály vzorku obdobně jako u vzorků na podpůrné struktuře.



Obr. 5-62 Srovnání vzorků strategie „Meander“ (1300-1400 mm/s)

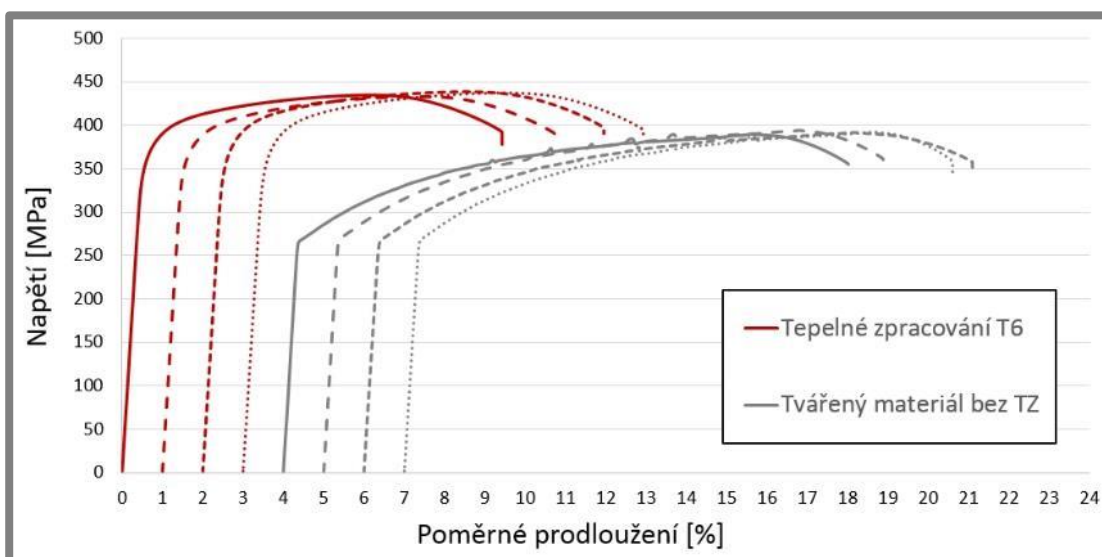
5.4 Testy mechanických vlastností

5.4

5.4.1 Referenční materiál

5.4.1

Jako první byl proveden test referenčního materiálu. Ze zakoupeného polotovaru bylo vyrobeno osm vzorků. Čtyři vzorky byly bez tepelného zpracování a další 4 vzorky prošly tepelným zpracováním T6 (rozpouštěcí žíhání na 530 °C pod dobu 8 hodin a následné ochlazení ve vodě a umělé stárnutí na 200 °C po dobu 24 hodin [24]). Naměřené tahové diagramy se nachází na Obr. 5-63 a průměrné naměřené hodnoty poté v Tab. 5-5. Protokol s měření se nachází v příloze 9. Jednotlivé měření vykazují minimální odchylky. U vzorků s tepelným zpracováním T6 došlo k navýšení meze kluzu i pevnosti, avšak došlo ke snížení tažnosti.



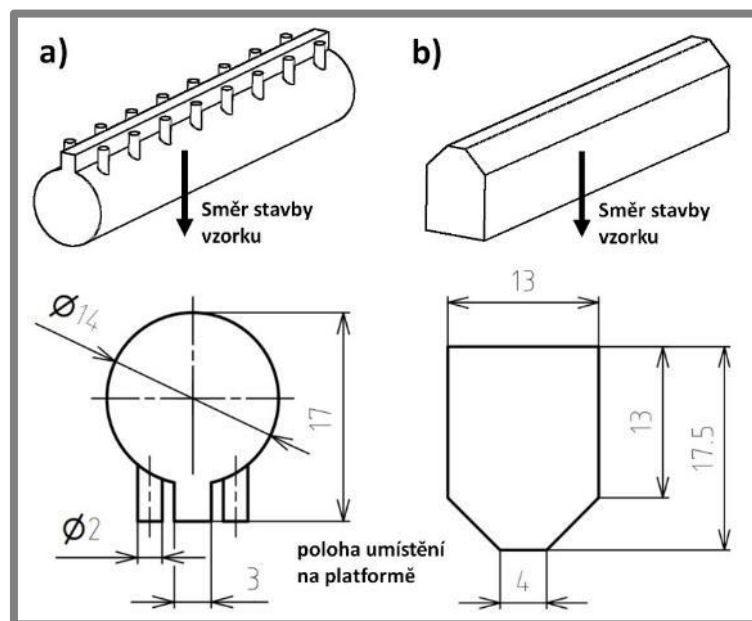
Obr. 5-63 Tahové diagramy referenčního materiálu

Tab. 5-5 Přehled výsledku referenčního materiálu

Zpracování	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
Bez TP	74,3	273	392	13,7	29
TP T6	73	372	436	9,2	25

V průběhu řešení diplomové práce byly společně s objemovými vzorky vyráběny i vzorky pro tahovou zkoušku. Tyto vzorky lze rozdělit do dvou kategorií podle tvaru vyráběného polotovaru. Nejprve byl vyráběn válcový polotovar (Obr. 5-64a). Později byl nahrazen polotovarem tvaru kvádru (Obr. 5-64b).

Všechny vzorky pro tahovou zkoušku vyrobené pomocí SLM byly testovány ve stavu „As build“, tedy bez žádného tepelného zpracování či jiných úprav. Pouze došlo k obrobení vzorků z vyrobených polotovarů.



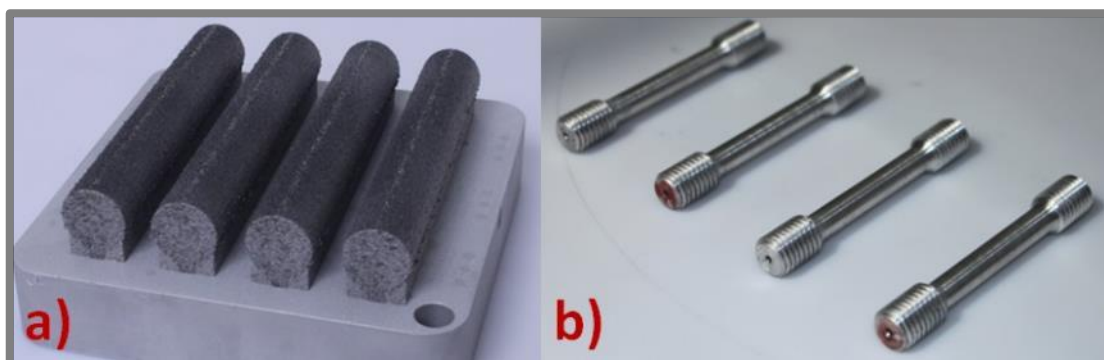
Obr. 5-64 a) Válcový polotovár b) Hranol se čtvercovou podstavou

Válcový polotovár má průměr 14 mm a délku 82 mm. Se stavební platformou je propojen 3 mm úzkým pásem materiálu a sérií pinů po obou stranách pásu. Během stavby toho polotovaru docházelo kvůli jeho délce ke vzniku velkého vnitřního napětí. V důsledku toho docházelo ke zvedání vzorku nad vrstvu nanášeného prášku, popřípadě odtržení od platformy. Z toho důvodu byl později nahrazen druhým polotovarem.

Jedná se o kvádr se zkosením 45° v oblasti napojení na platformu. Má stejnou délku jako původní válcový polotovár. Jeho napojení na platformu je větší s pozvolným přechodem v plný objem. Díky tomu byl proces stavby toho polotovaru stabilnější než toho válcového.

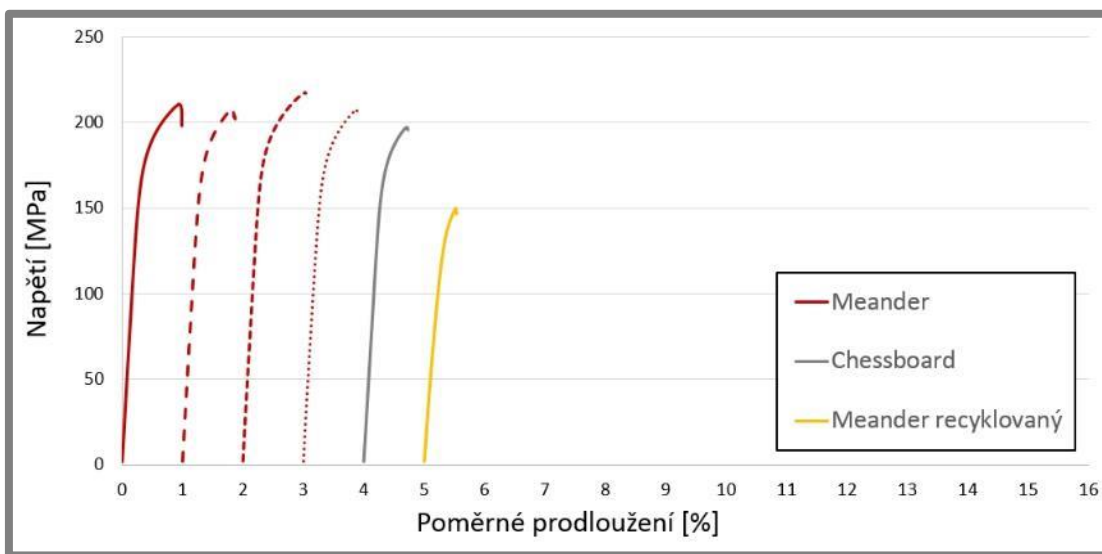
5.4.2 Válcový polotovár

První vzorky pro tahovou zkoušku byly vyrobeny s použitím procesních parametrů získaných na základě rešerše. Jednalo se o výkon laseru 200 W a skenovací rychlost 100 mm/s se strategií „Meander“ a otáčením drah laseru o 73°. S těmito parametry byly vyrobeny na malou stavební platformu čtyři vzorky (Obr. 5-65a), ze kterých byly následně obrobena testovací tělíska (Obr. 5-65b).



Obr. 5-65 a) Válcové polotovary b) Obrobené vzorky

K těmto čtyřem vzorkům byly následně dostavěny další dva. První měl stejné procesní parametry, ale byl vyroben z jedenkrát recyklovaného prášku. U toho druhého byla použita skenovací strategie „Chessboard“ s velikostí jednoho pole 5x5 mm. Tahové diagramy všech testovaných vzorků jsou na Obr. 5-66 a přehled naměřených hodnot v Tab. 5-6. Naměřené hodnoty vykazují nízký rozptyl. První čtyři vzorky strategie „Meander“ měly ve srovnání se strategií „Chessboard“ obdobné mechanické vlastnosti. Mírně nižší mechanické vlastnosti vykazuje vzorek vyrobený z recyklovaného prášku. Při porovnání s referenčním materiálem bylo docíleno přibližně 70% meze kluzu a došlo k desetinásobnému poklesu tažnosti materiálu.

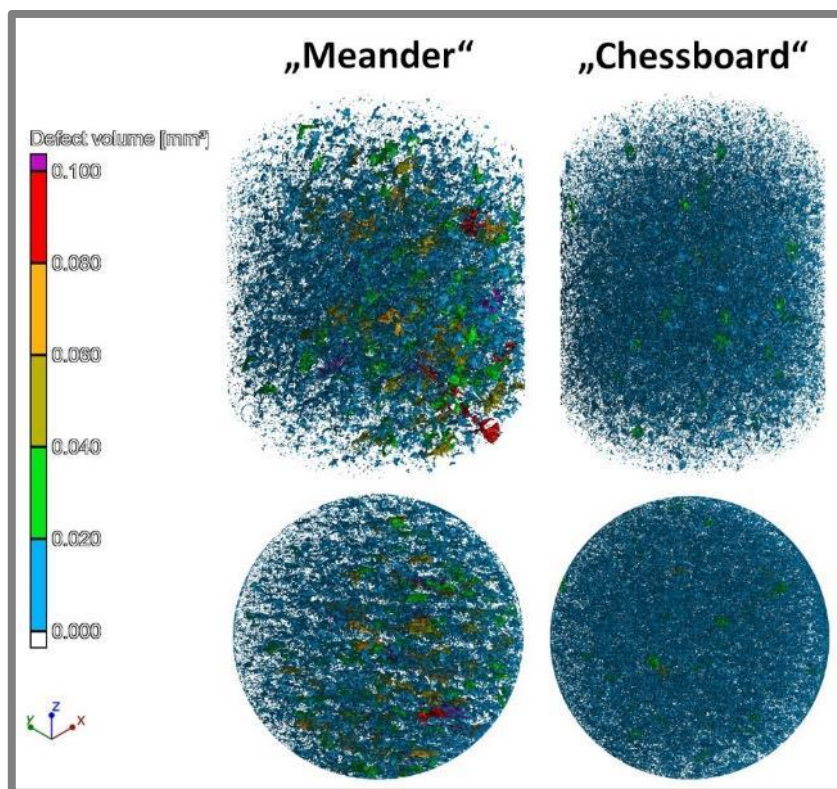


Obr. 5-66 Tahový diagram strategie „Meander“ a „Chessboard“ (Válcový polotovar)

Tab. 5-6 Přehled výsledků strategie „Meander“ a „Chessboard“ (Válcový polotovar)

Strategie	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
„Meander“	61	192	205	0,6	1,4
„Chessboard“	60	188	196	0,4	1,1
„Meander“ recyklovaný	50	149	150	0,2	0,5

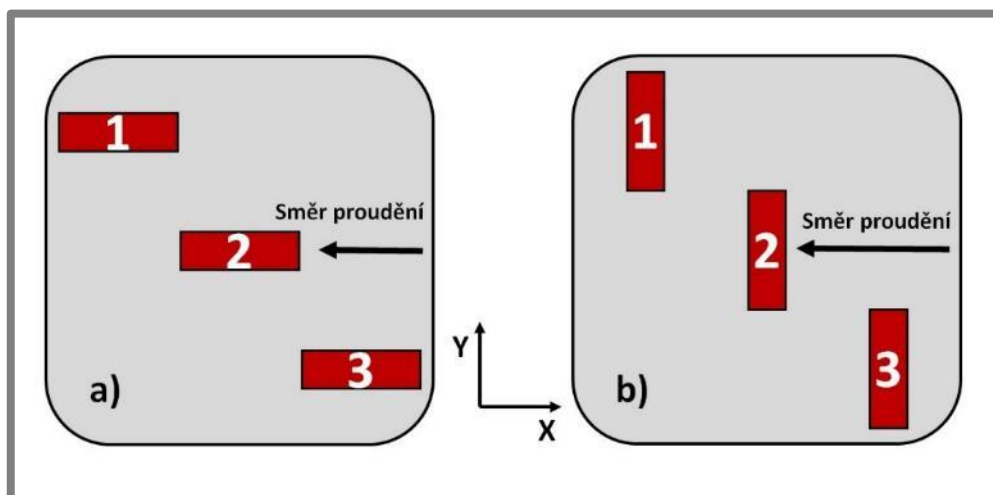
Před obrobením polotovarů byly dva vzorky podrobeny analýze μ CT. Jednalo se o jeden vzorek strategie „Meander“ a jeden vzorek se strategií „Chessboard“. Analyzována byla středová oblast vzorku v přibližné délce 20 mm. Srovnání můžeme vidět na Obr. 5-67. Vzorek strategie „Meander“ obsahuje menší množství vad, ale jejich rozměry jsou větší. Celkově byla naměřena porozita 1,25 %. Zatímco vzorek strategie „Chessboard“ obsahuje velké množství drobných pórů a celková naměřená porozita je pouze 0,95 %.



Obr. 5-67 μ CT analýza, strategie „Meander“ a „Chessboard“

Vliv pozice na platformě

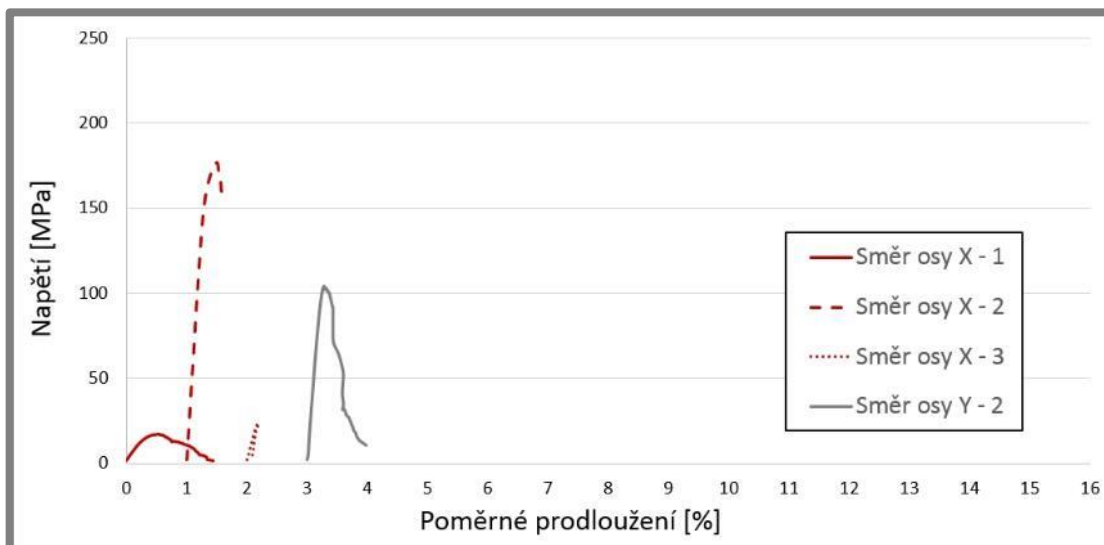
U dalšího experimentu bylo vyrobeno 6 vzorků se stejným nastavením výkonu laseru a skenovací rychlosti. Jako skenovací strategie byl použit „Chessboard“ s velikostí pole 5x5 mm. Vzorky byly postaveny na velkou platformu s vyhřevem 200 °C pro redukování vzniku vnitřního napětí ve vzorku. Výroby byla realizována ve dvou stavbách, kde rozmístění vzorků na platformě bylo dle schématu (Obr. 5-68).



Obr. 5-68 Schéma rozložení vzorků na platformě

Tři vzorky byly umístěny na diagonálu velké stavební platformy. U jedné stavby byl vzorek orientován delší stranou ve směru osy X a druhé ve směru osy Y. Toto rozložení

bylo voleno za účelem zjištění vlivu umístění vzorku na výsledné mechanické vlastnosti. Tahový diagram se nachází na Obr. 5-69. Výsledky testu potom v Tab. 5-7.



Obr. 5-69 Tahový diagram experimentů s pozicí vzorků na platformě

Tab. 5-7 Přehled výsledků experimentu s pozicí vzorků na platformě

Pozice vzorku	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
Osa X – 1	5	17	17	1,5	0,0
Osa X – 2	56	176	177	0,3	0,5
Osa X – 3	15	–	24	0,1	0,0
Osa Y – 1	–	–	–	–	–
Osa Y – 2	52	96	104	0,9	0,0
Osa Y – 3	–	–	–	–	–

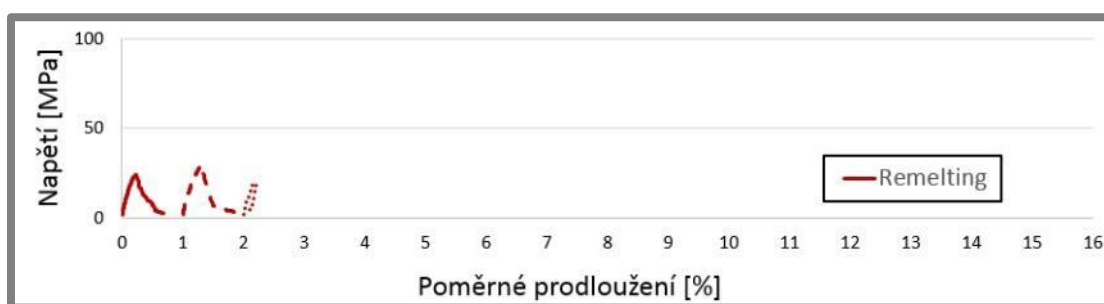
Z výsledků je patrné, že umístění vzorků na platformě má zásadní vliv na jejich mechanické vlastnosti. Nejlepšího výsledku je docíleno při umístění vzorku do středu platformy. Směr orientace vzorku má také vliv na mechanické vlastnosti. Při orientaci vzorku podél osy X bylo dosaženo srovnatelných výsledků s předchozím testem (v předchozím testu byly vzorky také orientovány ve směru osy X). Při orientaci podél osy Y byly naměřené mechanické vlastnosti až o 40 % horší. Vzorky umístěné na krajích platformy při této orientaci ani nebyly testovány. Jejich mechanické vlastnosti byly tak špatné, že došlo k jejich zničení při obrábění.

Tyto rozdíly ve vlastnostech mohou být způsobeny prouděním atmosféry v okolí vzorku, kde na okrajích platformy dochází k většímu víření zplodin. V případě orientace vzorku ve směru proudění poté dochází k postupnému odvodu spalin inertním plynem v úzké části. Zatímco při orientaci vzorku napříč je plocha kontaktu vzorku s proudícím plynem větší.

Strategie „Remelting“

V rámci projektu GAČR (Vývoj pokročilých materiálů s využitím metody laserového spékání) byly realizovány experimenty objemových vzorků pro strategii „Remelting“. Jelikož se jednalo o menší objemové vzorky 5x5x5 mm, nebyly zahrnuty do této diplomové práce. Strategie „Remelting“ spočívá ve dvojím skenování v rámci jedné vrstvy, kde na rozdíl od strategie „Pre-sintering“ probíhá obojí skenování se stejnými procesními parametry a mezi nimi dojde k opětovnému nanesení prášku pro zaplnění mezer ve vzorku. Díky tomu dojde k postavení vzorku s vysokou relativní hustotou. Tyto vzorky ovšem vykazují zvýšený výskyt trhlin.

S touto strategií byly na malé stavební platformě vyrobeny čtyři vzorky pro tahovou zkoušku. U jednoho ze vzorků došlo opět k jeho zničení během obrábění. Získané tahové diagramy můžeme vidět na Obr. 5-70. V Tab. 5-8 se nachází průměr z naměřených dat.



Obr. 5-70 Tahový diagram experimentů se strategií „Remelting“

Tab. 5-8 Průměr výsledků tahové zkoušky pro strategii „Remelting“

Strategie	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
„Remelting“	14	20	24	0,6	–

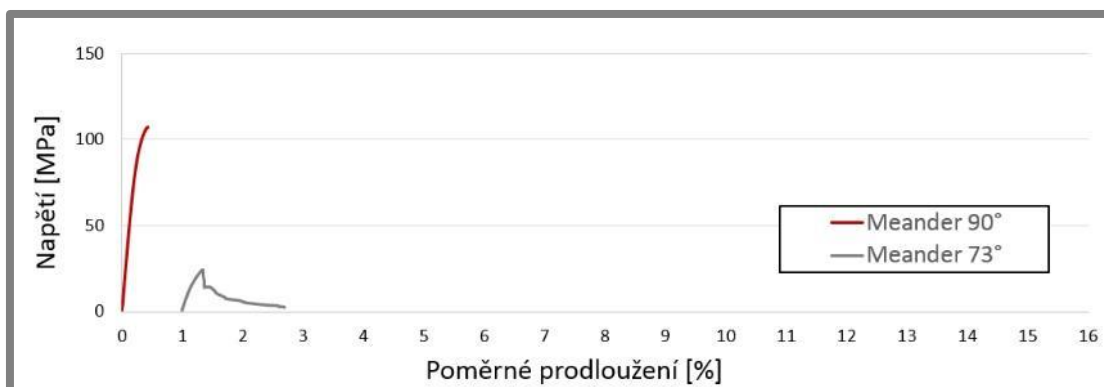
Strategie „Remelting“ se ukázala jako nevhodný postup pro zpracování slitiny AW 2618. Lze díky ní vyrobit vzorky s vysokou relativní hustotou, ale velký výskyt trhlin má za následek enormní zhoršení mechanických vlastností.

5.4.3 Kvádrový polotovár

Pro první vzorky s tímto typem polotovaru byla použita strategie „Meander“, aby bylo možné porovnání s původními testy. Byl vyroben jeden vzorek s natáčením drah laseru mezi vrstvami 73° a druhý s natáčením o 90°. Ostatní procesní parametry byly zachovány. Výsledné tahové diagramy se nachází na Obr. 5-71 a naměřené hodnoty v Tab. 5-9.

Tab. 5-9 Výsledky tahové zkoušky strategie „Meander“ (kvádrový polotovár)

Strategie	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
„Meander“ 90°	42	-	107	0,2	0,2
„Meander“ 73°	10	17	24	1,7	0,1

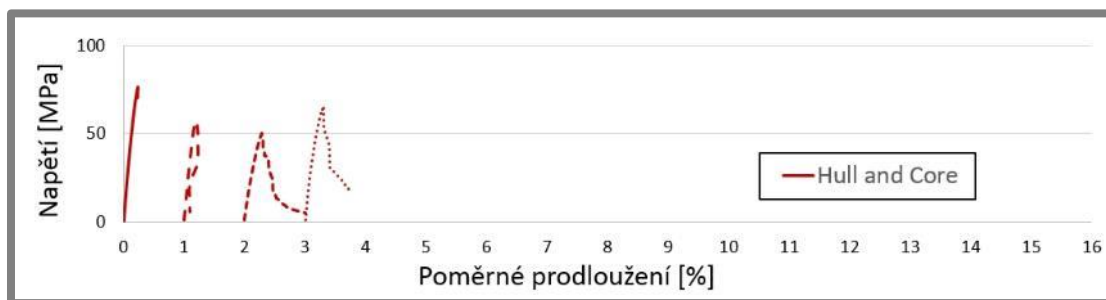


Obr. 5-71 Tahový diagram strategie „Meander“ (kvádrový polotovar)

První vzorek dosáhl 50 % hodnoty meze pevnosti oproti vzorku strategie „Meander“ stavěného jako válcový polotovar. To může být způsobeno tím, že u válcového polotovaru byl více redukován odvod tepla, což na základě pozdějších výsledků objemových vzorků snižuje porozitu vzorku. Druhý vzorek dosáhl obdobných mechanických vlastností jako u strategie „Remelting“.

Strategie „Hull and Core“

Další vzorky byly vyrobeny pomocí strategie „Hull and Core“. Kde byly použity procesní parametry nejlepšího výsledku z experimentů s objemovými vzorky. Tedy rozdělení do tří oblastí s postupným zvyšováním vstupní energie od kraje do středu vzorku. Celkem byly vyrobeny čtyři vzorky. U těchto vzorků byl odstraněn lichoběžníkový přechod mezi vzorkem a platformou a vzorky byly postaveny přímo na platformu. Výsledný tahový diagram můžeme vidět na Obr. 5-72 a průměr s naměřených hodnot se nachází v Tab. 5-10.



Obr. 5-72 Tahový diagram pro strategii „Hull and Core“

Tab. 5-10 Průměrná hodnota výsledků tahové zkoušky pro strategii „Hull and Core“

Strategie	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
„Hull and Core“	34	44	62	0,5	0

Obdobně jako u strategie „Remelting“ ani pro strategii „Hull and Core“ vzorky nedosahují dobrých mechanických vlastností i když obsahují jen minimum pórů. Opět je to způsobeno velkým výskytem trhlin. Tyto trhliny u strategie „Hull and Core“ vznikají na hranici mezi jednotlivými oblastmi. V případě vzorku pro tahovou zkoušku se jedná také o směr zatěžování.

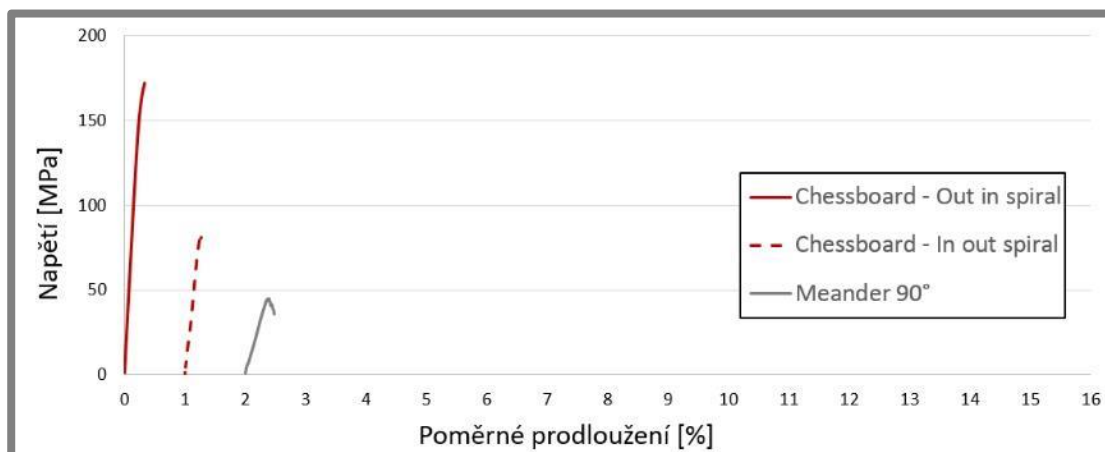
Ploché vzorky

Pro redukování stavěného objemu byl proveden experiment s plochými vzorky pro tahovou zkoušku. Jednalo se o vzorky E 3 x 8 x 30 podle normy DIN 50125 (E) [25]. Úměrně k rozměrům testovacího vzorku byl upraven i polotovár na kvádr o rozměrech 90x11x5 mm. Díky tomu byl průřez vzorku zmenšen o více než polovinu. Byly postaveny čtyři vzorky (Obr. 5-73).



Obr. 5-73 Polotovary pro ploché vzorky

Dva se strategií „Meander“ a otáčením směru skenování o 73° a 90°. Druhé dva se strategií „Chessboard“ s velikostí pole 3x3 a nastavením „Out in spiral“ a „In out spiral“. Tahový diagram se nachází na Obr. 5-74 a výsledky zkoušky v Tab. 5-11.



Obr. 5-74 Tahový diagram pro ploché vzorky

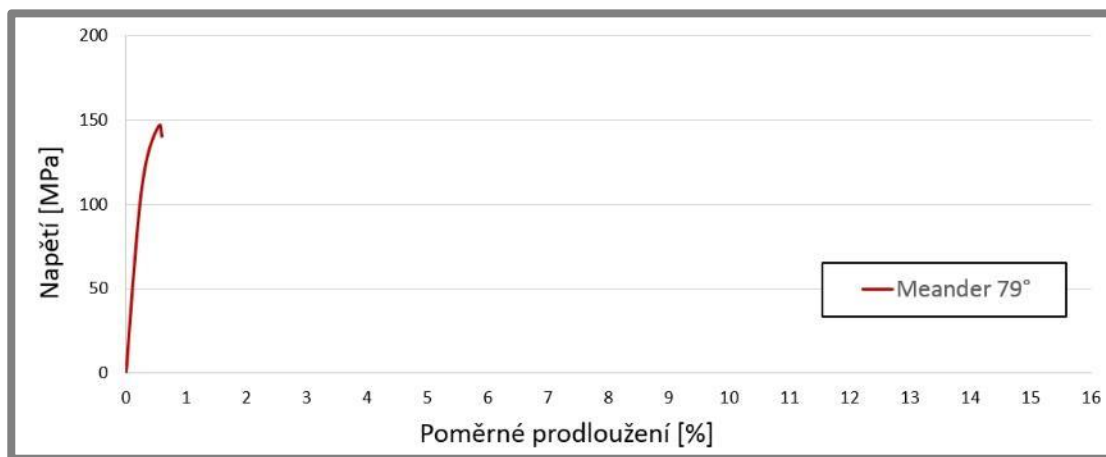
Tab. 5-11 Výsledky tahové zkoušky pro ploché vzorky

Strategie	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
„Chessboard“ Out in spiral	65	–	172	0,1	–
„Chessboard“ In out spiral	39	–	84	–	–
„Meander“ 90°	13	36	50	–	–
„Meander“ 73°	–	–	–	–	–

Nejlépších výsledků dosáhly vzorky se strategií „Chessboard“. Vzorek s nastavením „Out in spiral“ dosáhl meze pevnosti 172 MPa, což je srovnatelné s doposud nejlepším výsledkem. Oproti němu měl však mnohem nižší tažnost. Vzorky se strategií „Meander“, sloužící k porovnání s ostatními tahovými vzorky, dopadly hůře. Jeden z nich byl opět zničen při obrábění. Nelze tedy říci, že by změna tvaru vyráběného polotovaru měla pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

Vzorek na podpůrných strukturách

Po odladění nastavení podpůrných struktur u objemových vzorků byl se stejným nastavením postaven vzorek pro tahovou zkoušku. Byla použita strategie „Meander“ s výkonem laseru 200 W a skenovací rychlostí 200 mm/s. Po vyrobení byl vzorek podroben analýze na μ CT. Póry se vyskytovaly rovnoměrně v celém objemu vzorku a celková naměřená porozita byla 2,26 %. Následně byl vzorek obroben na válcový tahový vzorek 6 x 30 mm a bylo provedeno měření. Tahový diagram můžeme vidět na Obr. 5-75. Výsledky měření jsou v Tab. 5-12.



Obr. 5-75 Tahový diagram vzorku na podpůrných strukturách.

Tab. 5-12 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek na podpůrných strukturách

Strategie	E [Gpa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
„Meander“ 79°	50	144	147	0,6	1,1

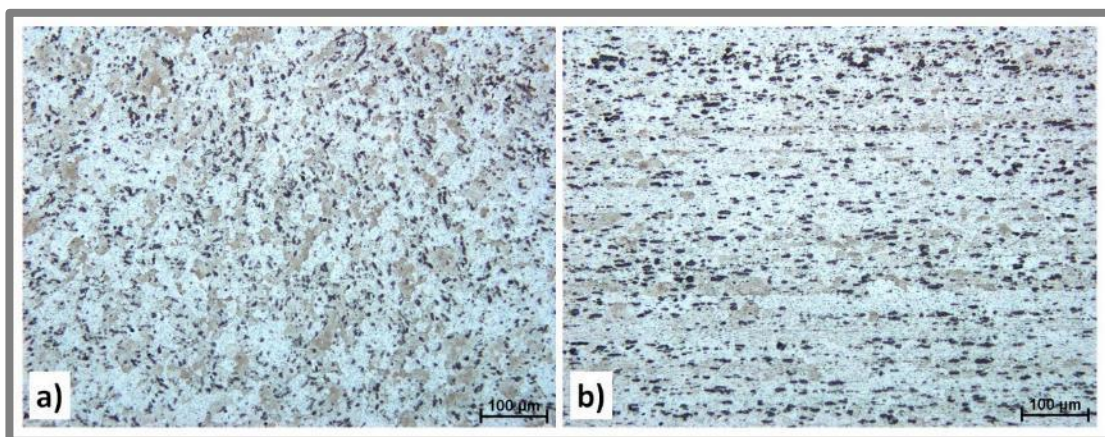
Ve srovnání s ostatními vzorky postavených jako kvádrový polotovar vykazuje vzorek na podpůrných strukturách zvýšení mechanických vlastností. Ze všech těchto vzorků má nejvyšší tažnost. Ve srovnání s nejlepším vyrobeným vzorkem s válcovým polotovarem dosáhl stejné tažnosti avšak pouze 75% meze kluzu a pevnosti. Při jeho výrobě ale nedochází ke vzniku tak velkého vnitřního pnutí a vzorek nemá tendenci se odtrhávat od platformy.

5.4.4 Mikrostruktura a fraktografie

Ve spolupráci s Ústavem materiálových věd a inženýrství byly pořízeny snímky mikrostruktury pro vybrané vzorky. Pomocí elektronového mikroskopu byly pořízeny i snímky lomových ploch.

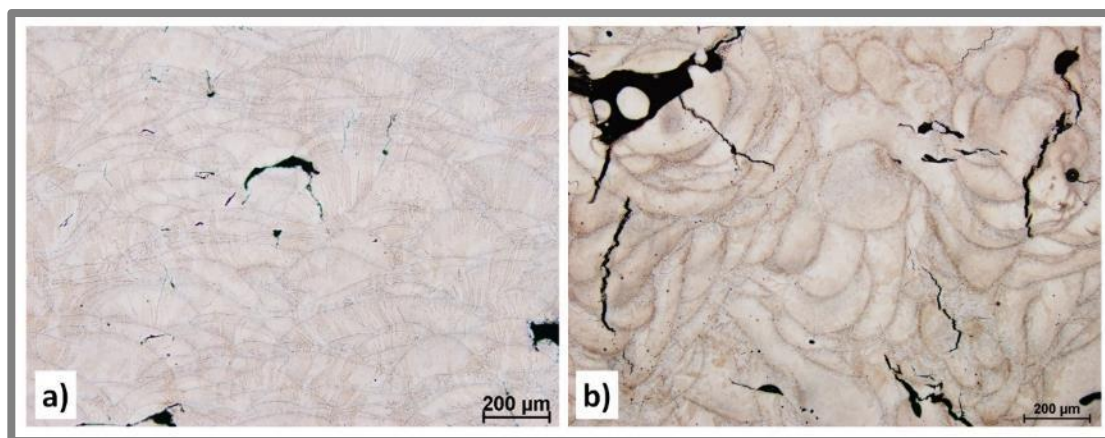
Mikrostruktura

Na Obr. 5-76 můžeme vidět mikrostrukturu tvářeného referenčního materiálu bez tepelného zpracování. Vlevo je vidět v příčném řezu a vpravo v podélném. U podélného řezu je zřetelná orientace zrn ve směru tváření. Stejně tak u částic intermediálních fází typických pro tuto slitinu. U mikrostruktury tvářeného materiálu nebyly pozorovány žádné trhliny a póry.



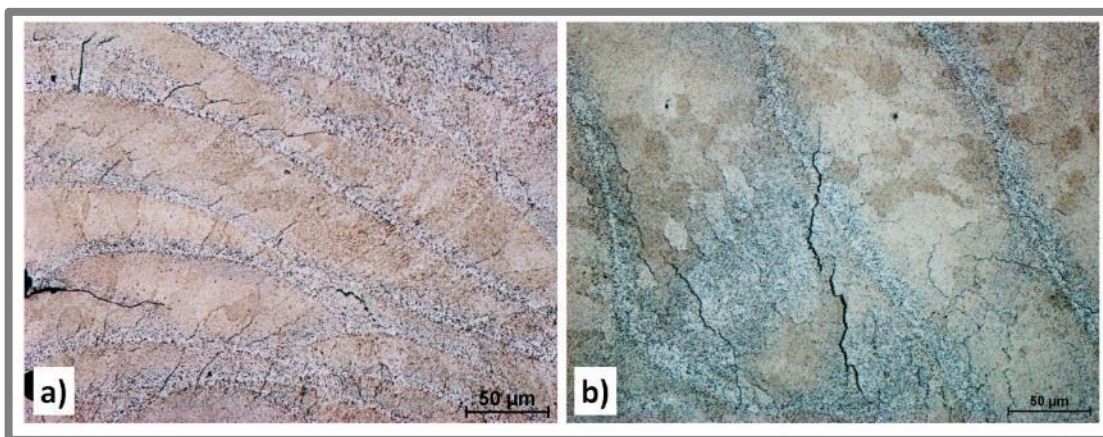
Obr. 5-76 Referenční materiál a) směr příčný b) směr podélný

Materiál zpracovaný technologií SLM vykazuje rozdílnou mikrostrukturu. Na (Obr. 5-77) se opět nachází snímky v příčném a podélném směru. Tyto směry jsou vztaženy ke vzorku pro tahovou zkoušku. Vzhledem k procesu výroby můžeme na příčném řezu pozorovat řez vrstvami stavěného materiálu a v podélném směru řez jednou vrstvou. V rámci podélného i příčného směru můžeme pozorovat jednotlivé návary vzniklé při skenování laseru. Na první pohled jsou v mikrostruktuře patrné póry různých tvarů a také trhliny šířící se od hranic nepravidelných pórů.



Obr. 5-77 SLM materiál a) směr příčný b) směr podélný

Při pohledu na větší zvětšení (Obr. 5-78a) jsou zřetelněji vidět jednotlivé dráhy laseru společně s hranicemi zrn. Na těchto hranicích můžeme vidět vyloučené částice intermediální fáze. Tyto částice jsou při porovnání s tvářeným materiálem mnohem jemnější. Na (Obr. 5-78b) můžeme pozorovat drobné trhliny, které vznikají v oblasti vyloučených intermediální fází. Podle [28] se může jednat o transkrystalické solidifikační trhliny, které vznikají v důsledku vnitřního napětí mezi fázemi tuhnutí materiálu. Toto napětí je způsobeno velkým teplotním rozdílem mezi solidu a likvidu a také velkou teplotní roztažností hliníkových slitin.



Obr. 5-78 Detailní pohled na SLM mikrostrukturu a) směr příčný b) směr podélný

V rámci studie mikrostruktury obou stavů materiálu bylo provedeno měření mikrotvrdosti podle Vickerse. Výsledkem (Tab. 5-13) jsou průměrné hodnoty z pěti měření. Pro srovnání bylo provedeno měření mikrotvrdosti i na vzorcích vyrobených se zvýšeným výhřevem platformy.

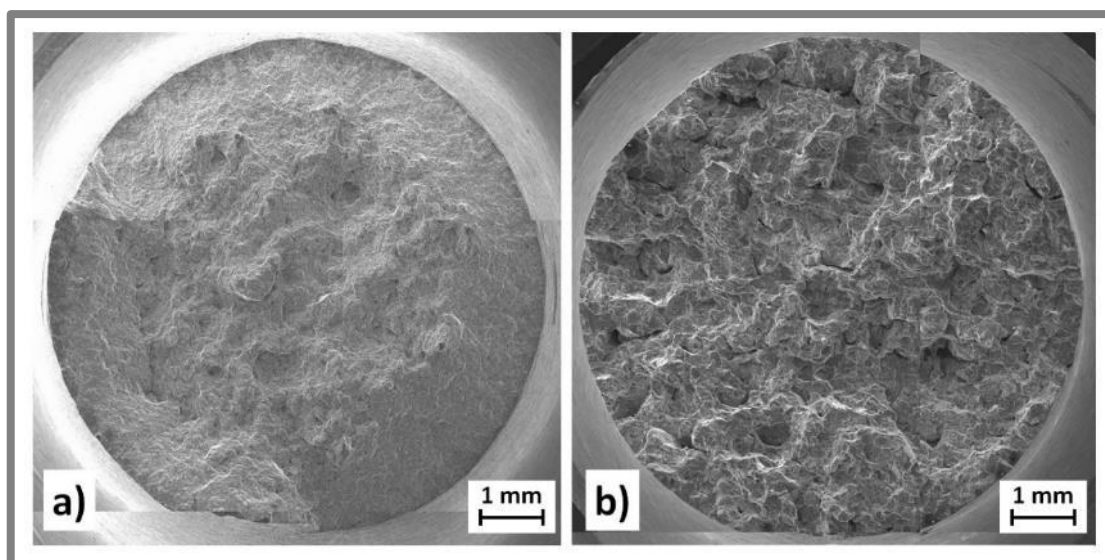
Tab. 5-13 Výsledky měření tvrdosti

Materiál:	Tvářený materiál	SLM materiál	SLM materiál s výhřevem
Tvrdost HV 0,3	104	100	70

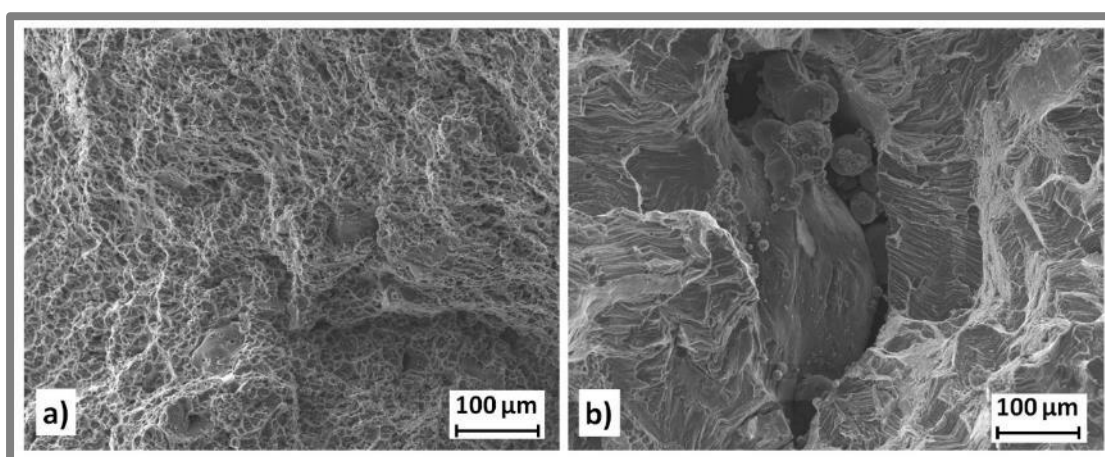
Naměřené tvrdosti tvářeného a SLM materiálu jsou téměř shodné. Vzorky vyrobené se zvýšeným výhřevem vykazovaly nižší tvrdost. Měření bylo provedeno na zbytcích vzorků po metalografickém výbrusu. Kde jejich výška byla pouze 0,8 mm. Je tedy pravděpodobné, že materiál byl během stavby tepelně ovlivněn.

Fraktografie

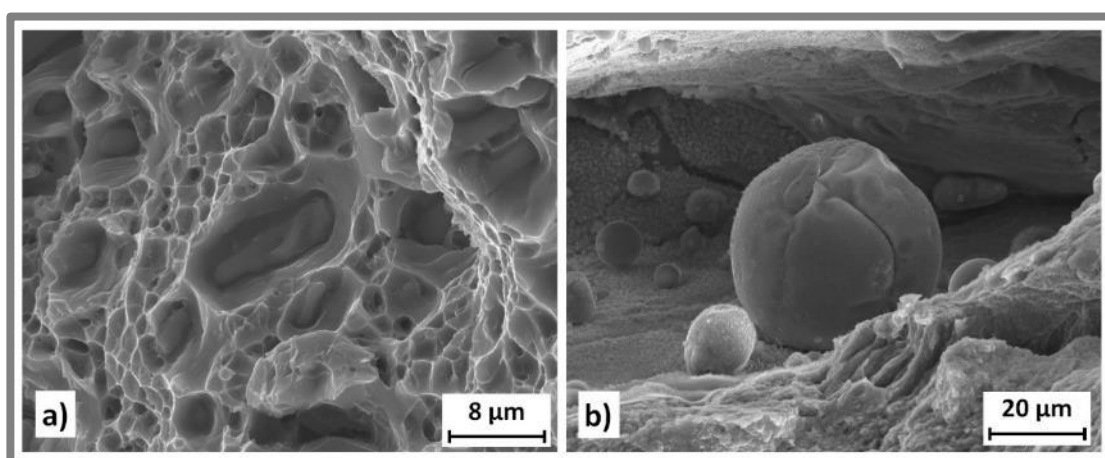
Přehledové snímky lomových ploch se nachází na Obr. 5-79. Vlevo je tahový vzorek tvářeného materiálu a vpravo se nachází vzorek vyrobený pomocí SLM. U obou vzorků převládá tvárný lom. Ze snímků je patrné, že lomová plocha SLM vzorku je členitější a hrubší než ta od tvářeného vzorku. Na detailních snímcích (Obr. 5-80a) a (Obr. 5-80b) je u obou lomů patrná jamkovitá morfologie. U tvářeného vzorku je tato morfologie výraznější a v jamkách je možno pozorovat částice intermediálních fází (Obr. 5-81a). U SLM vzorků byly na lomovém povrchu pozorovány póry a smršťení. V některých defektech byly pozorovány částice nenataveného prášku (Obr. 5-81b)



Obr. 5-79 Lomové plochy a) tvářený materiál b) SLM materiál



Obr. 5-80 a) Lomová plocha tvářený vzorek b) Lomová plocha SLM vzorek



Obr. 5-81 a) Částice intermediální fáze b) Nenatavená částice prášku uvnitř póru

6 DISKUZE

6

6.1 Analýza práškového materiálu

6.1

Práškový materiál použitý při řešení této diplomové práce svou distribucí velikosti částic splňuje požadavky pro zpracování technologií SLM. Jako výška jedné vrstvy byla použita hodnota 50 μm . Dle SEM snímků má většina částic kulovitý tvar, což je pro proces výroby optimální. Analýza chemického složení potvrdila shodu hmotnostního zastoupení jednotlivých legujících prvků s normou ČSN EN 573-3.

6.2 Návarové experimenty

6.2

Pro návarové experimenty bylo použito experimentální ruční nanášecí zařízení. V prvotním experimentu byla potvrzena homogenita vrstvy nanesené pomocí ručního nanášecího zařízení a také reprodukovatelnost návarových experimentů.

Dále byla prozkoumána široká oblast procesních parametrů, výkonu laseru a skenovací rychlosti. Na základě metalografického výbrusu příčného řezu byly zjištěny základní rozměry těchto návarů. Snímky výbrusů byly následně použity pro sestavení přehledové tabulky (procesní mapy). S využitím této tabulky byly identifikovány dvě oblasti s tvarem návaru vhodným pro SLM proces. První oblast spadá k výkonu laseru 200 W a skenovací rychlosti 200 mm/s a druhá k výkonu laseru 400 W a skenovací rychlosti 1400 mm/s. Obě tyto oblasti potvrzují výsledky publikované autory *Koutný* [9] a *Koukal* [10].

Pro skenovací rychlosti 250-500 mm/s a výkon laseru 300-400 W byl pozorován prudký nárůst v hloubce průvaru a šířce návaru. Toto abnormální chování může být způsobeno změnou optických vlastností materiálu. Především změnou odrazivosti, kdy pro tyto procesní parametry dochází k pohlcení většího množství vstupující energie.

6.3 Skenovací a procesní strategie

6.3

V rámci řešení diplomové práce bylo prozkoumáno několik skenovacích a procesních strategií. Předmětem výzkumu byl vliv těchto strategií na výslednou relativní hustotu materiálu a identifikování vad, které ve vzorku vznikají procesem výroby.

6.3.1 „Meander“

6.3.1

U objemových vzorků se strategií „Meander“ byl pozorován zvýšený výskyt „keyhole“ pórů. Tyto vady vznikají v důsledku prudkého tuhnutí tavná lázně, kdy tavenina tuhne dříve, než je schopná zaplnit celý objem. Zvýšený výskyt těchto defektů byl pozorován v oblastech, které byly skenovány jako poslední. Při zkouškách mechanických vlastností bylo dosaženo meze pevnosti 107 MPa.

6.3.2 „Chessboard“

6.3.2

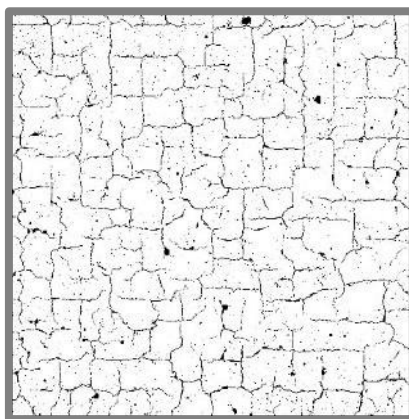
U strategie „Chessboard“ dochází k lepšímu rozložení energie v rámci vrstvy vzorku. I u této strategie byl pozorován zvýšený výskyt „keyhole“ pórů v oblastech, které jsou skenovány jako poslední. Celkový výskyt pórů však byl nižší, než u strategie „Meander“. Použitím nastavení „Out in spiral“ bylo docíleno další redukce pórů a došlo k jejich přemístění do středu vzorku. Při zkoušce mechanických vlastností bylo dosaženo meze pevnosti 172 MPa.

6.3.3 „Hull and Core“

Rozdělením vzorku na oblasti s různými procesními parametry bylo docíleno optimálnějšího rozložení energie ve vrstvě, kdy objemová hustota energie pro střed vzorku („Core“) byla vyšší, než pro okraj vzorku („Hull“). S rostoucí dodanou energií do středu vzorku docházelo k úbytku „keyhole“ pórů a začaly se v menší míře objevovat póry metalurgické. Pro nastavení parametrů výkonu laseru 290 W a skenovací rychlosti 180 mm/s byla naměřená nejvyšší relativní hustota. U všech vzorků strategie „Hull and Core“ byl na hranici mezi jednotlivými oblastmi pozorován zvýšený výskyt trhlin. Tyto trhliny mají za následek razantní snížení naměřených mechanických vlastností materiálu. Byla naměřena průměrná mez kluzu 44 MPa a mez pevnosti 62 MPa.

6.3.4 „Remelting“

Nejnižší mechanické vlastnosti vykazovaly vzorky se strategií „Remelting“. Jednalo se hodnoty meze kluzu 20 MPa a meze pevnosti 24 MPa. U této strategie docházelo ke dvojímu skenování jedné vrstvy s otočením o 90° mezi jednotlivým skenováním. Tomu odpovídá i výskyt trhlin (Obr. 6-1). Trhliny se ve vzorku šíří ve dvou na sebe kolmých směrech.



Obr. 6-1 Trhliny ve vzorku strategie „Remelting“

6.3.5 „Pre-sintering“

Na rozdíl od slitiny AlSi10Mg, jejímž zpracováním se zabýval *Aboulkhair* [3], mělo použití strategie „Pre-sintering“ u slitiny EN AW 2618 negativní vliv na relativní hustotu vzorku. S rostoucím výkonem laseru se zvyšoval výskyt „keyhole“ pórů. Tyto póry se soustředily především ve středu vzorku. Vzhledem k tomuto negativnímu vlivu nebyly pro tuto strategii realizovány tahové zkoušky.

6.3.6 Vzorky na podpůrné struktuře

U vzorků vyrobených na podpůrné struktuře bylo pozorováno navýšení relativní hustoty pro skenovací strategii „Meander“ i „Chessboard“. Toto navýšení může být způsobeno sníženým odvodem tepla ze vzorku. Podpůrné struktury mají mnohem menší plochu kontaktu s platformou, než celá stěna vzorku. Prášek vyplňující prostor mezi vzorkem a platformou má izolační charakter. Ke stejnému závěru došli i autoři *Karg* [6] a *Ahuja* [8]. Relativní hustota vzorků vyrobených na podpůrné struktuře se pohybovala nad hranicí 99 %. I u těchto vzorků byl pozorován výskyt trhlin.

U strategie „Meander“ docházelo k šíření těchto trhlin především ve směru diagonály vzorku.

U tahových zkoušek vzorků na podpůrné struktuře bylo dosaženo nejlepších mechanických vlastností. A to jak pro válcový tak i kvádrový polotovár. Obě skenovací strategie dosahovaly srovnatelných výsledků. Nejlepší výsledek vykazoval hodnoty meze kluzu 192 MPa a meze pevnosti 205 MPa. Analýza porozity pomocí μ CT potvrdila výsledky objemových vzorků, kde u strategie „Meander“ se vyskytují větší póry nerovnoměrně rozmístěné v objemu vzorku. Zatímco u strategie „Chessboard“ se vyskytuje větší množství drobnějších pórů.

6.3.7 Zvýšený výhřev platformy

6.3.7

Za účelem dalšího snížení odvodu tepla ze vzorku byl ve spolupráci s Technickou univerzitou Graz realizován experiment s výhřevem stavební platformy na 400 °C. V oblasti nižších skenovacích rychlostí došlo k vymizení trhlin, avšak došlo k nárůstu výskytu metalurgických pórů. Toto pozorování nasvědčuje hypotéze, že neexistuje oblast procesních parametrů, ve které by se nevyskytovala ani jedna z těchto vad. K jejímu potvrzení je potřeba provést další experimenty se zvýšeným výhřevem platformy.

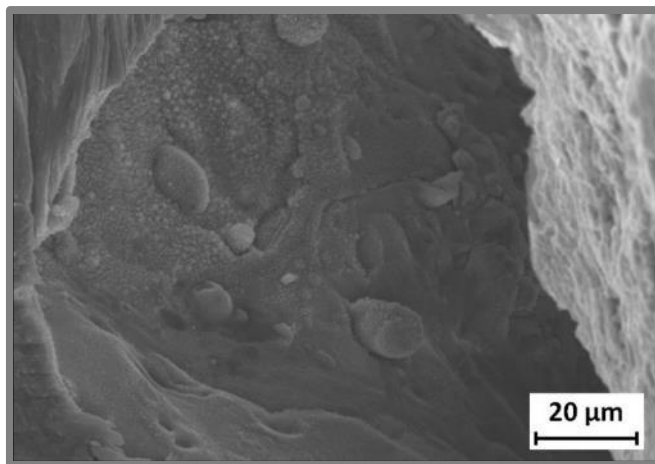
6.4 Principy vzniku vad v materiálu

6.4

6.4.1 Oxidační vrstva

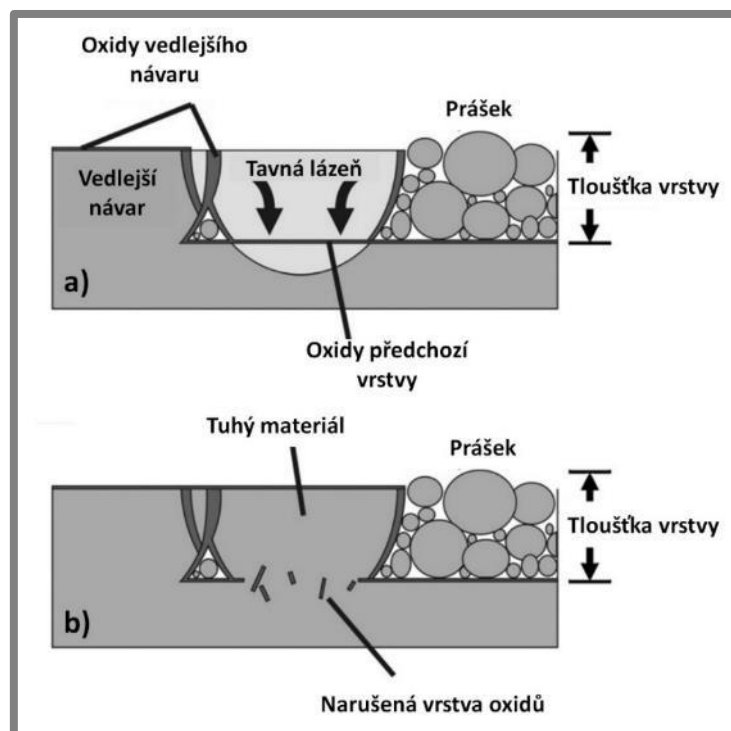
6.4.1

Na SEM snímcích lomových ploch byly u SLM materiálu pozorovány póry, které obsahovaly nenatavené částice prášku. Povrch těchto vad byl hladký a pokryt tenkou oxidickou vrstvou (Obr. 6-2).



Obr. 6-2 Oxidická vrstva na povrchu póru

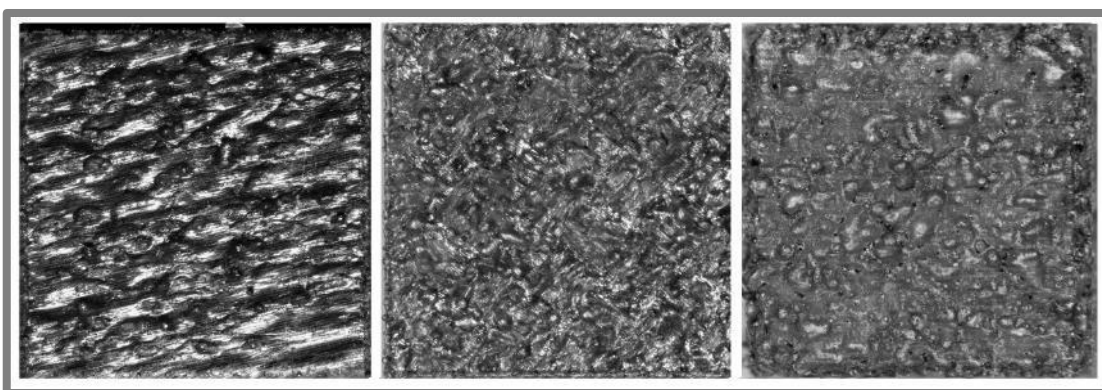
Louvis [27] popisuje ve své publikaci princip vzniku oxidačních inkluzí, kde v důsledku působení Marangoniho síly dochází k proudění vzniklé tavné lázně. Toto proudění je schopné narušit oxidickou vrstvu na povrchu materiálu (Obr. 6-3a), avšak nedojde k porušení oxidické vrstvy mezi jednotlivými návary. V důsledku toho dochází k uvěznění práškového materiálu uvnitř pórů (Obr. 6-3b). Hypotéza, zda dochází ke vzniku pórů právě tímto principem, nebyla podrobněji prozkoumána.



Obr. 6-3 Princip vzniku oxidačních inkluzí a) Marangoniho efekt b) tuhnutí lázně [26] (upraveno)

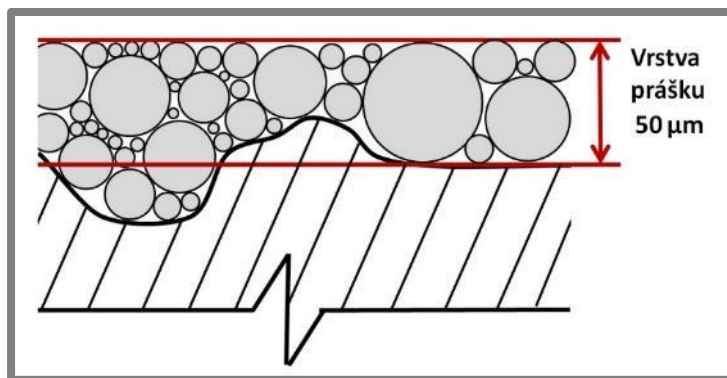
6.4.2 Nerovnoměrnost vrstvy

U všech zkoumaných skenovací strategií byl pozorován vznik nerovnoměrného hrubého povrchu (Obr. 6-4).



Obr. 6-4 Ukázka hrubého povrchu vzorků

Tento hrubý povrch může ovlivňovat stabilitu tavné lázně, jelikož dochází k natavování nerovnoměrné vrstvy (Obr. 6-5). Pokud je skenována vrstva tlustší, než 50 μm , může docházet k nedokonalému propojení s předchozí vrstvou. Naopak při skenování vrstvy s menší tloušťkou může docházet k vytvoření hluboké tavné lázně a následnému vzniku staženin.



Obr. 6-5 Nerovnoměrná vrstva prášku na hrubém povrchu

6.4.3 Solidifikační trhliny

6.4.3

Při zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 pomocí SLM se jako největší problém jeví výskyt solidifikačních trhlín v celé zkoumané šíři procesních parametrů. Autoři v [5] popisují vznik těchto trhlín při svařování hliníkových slitin a uvádí, že slitina 2618 je svým chemickým složením velice náchylná k tvorbě těchto trhlín. Autoři v publikaci [28] popisují výskyt těchto trhlín i při zpracování hliníkových slitin pomocí SLM. Především u slitin třídy 2000 a 6000.

Výskyt solidifikačních trhlín byl pozorován v mikrostruktuře materiálu (Obr. 6-6) a podle jejich výskytu na hranici tepelně ovlivněné oblasti lze předpokládat, že se jedná o transkrystalické solidifikační trhliny. Ty vznikají v důsledku vzniku tahových napětí mezi kapalnými a tuhými oblastmi tavné lázně.



Obr. 6-6 Solidifikační trhliny v mikrostruktuře

Při srovnání mechanických vlastností tvářeného a SLM materiálu dosahuje tvářený materiál dvojnásobné hodnoty meze pevnosti. Na fraktografických snímcích byly pozorovány rozdíly v lomových plochách mezi těmito materiály. SLM materiál vykazoval přechody mezi křehkým a tvárným lomem, zatímco u tvářeného materiálu docházelo ke tvárnému lomu s výraznou jamkovitou morfologií. Naměřená tvrdost obou materiálů dosahovala srovnatelných hodnot. Z toho můžeme usuzovat, že snížené mechanické vlastnosti SLM materiálu jsou způsobeny především výskytem imperfekcí v mikrostruktuře (především póry a trhliny).

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala zkoumáním procesních parametrů pro zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 pomocí technologie Selective laser melting. Práce je součástí projektu GAČR („Vývoj pokročilých materiálů s využitím metody laserového spékání“). Hlavním cílem bylo objasnit vliv jednotlivých procesních parametrů při zpracování hliníkové slitiny EN AW 2618 technologií Selective Laser Melting na výslednou porozitu materiálu a jeho mechanické vlastnosti.

V teoretické části je především zpracován současný stav výzkumu zpracování hliníkových slitin touto technologií. Zejména je kladen důraz na hliníkové slitiny skupiny 2000, kde hlavním legujícím prvkem je měď. Dále popisuje postup experimentů pro nalezení vhodných procesních parametrů.

V praktické části bylo pro výrobu experimentálních vzorků použito zařízení SLM 280 HL. Vzorky byly vyrobeny z práškového materiálu, který má chemické složení odpovídající hliníkové slitině EN AW 2618 podle normy ČSN EN 573-3. Nejprve byly provedeny návarové experimenty pro prozkoumání širší oblasti procesních parametrů. Výsledkem bylo nalezení dvou oblastí parametrů použitých pro výrobu objemových vzorků. V rámci výroby objemových vzorků bylo navázáno na současný stav řešené problematiky. Byl prozkoumán vliv několika skenovacích a jiných procesních strategií na relativní hustotu vzorku. Tento vliv nebyl doposud popsán v žádné z odborných publikací. U nejlepšího vzorku bylo docíleno relativní hustoty 99,63 %. Všechny zkoumané vzorky obsahovaly trhliny.

Po provedení tahových zkoušek se ukázalo, že tyto trhliny mají zásadní vliv na mechanické vlastnosti SLM materiálu. U nejlepšího vzorku bylo dosaženo meze kluzu 196 MPa a meze pevnosti 208 MPa. Pro srovnání referenční tvářený materiál dosáhl hodnot meze kluzu 273 MPa a meze pevnosti 392 MPa. Materiál s tepelným zpracováním T6 překonal oba tyto výsledky. Při měření tvrdosti však bylo pro oba materiály dosaženo obdobných hodnot. Pro SLM materiál 100 HV 0,3 a pro tvářený 104 HV 0,3. Z toho vyplývá, že za snížené mechanické vlastnosti SLM materiálu můžou především vady ve struktuře materiálu, jako jsou póry a trhliny.

Všechny cíle práce byly splněny. Nad rámec původního plánu byl ve spolupráci s Technickou univerzitou Graz realizován experiment pro zjištění vlivu zvýšeného výhřevu stavební platformy na výskyt trhlín ve zkoumaných vzorcích. Výsledky ukazují, že je možné vyrobit vzorek bez viditelného výskytu trhlín. Tento vzorek však obsahuje velké množství metalurgických pórů. Z výsledků je patrné, že se snižující se skenovací rychlostí ubývá množství trhlín, ale dochází ke zvyšování procentuálního zastoupení metalurgických pórů ve vzorku. Tento fakt nasvědčuje hypotéze, že neexistuje procesní okno, ve kterém by se nevyskytovala ani jedna z těchto vad. Pro její potvrzení je potřeba provést další studii.

Pokud by byla nalezena optimální kombinace procesních parametrů, všechny dosavadní výsledky naznačují tomu, že se bude nalézat v oblasti nízkých skenovacích rychlostí. Tato oblast je značně neperspektivní, jelikož je proces výroby velice pomalý. Výroba jednoho vzorku pro tahovou zkoušku v této práci trvala 5-8 hodin. Touto rychlostí by výroba větších dílů byla značně neekonomická.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

8

- [1] *Design for SLM* [online]. [cit. 2016-24-04]. Dostupné z: http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/uploads/7/4/4/0/7440869/9955522_orig.jpg
- [2] SLM SOLUTION. *SLM 280 HL Datasheet*. [online]. [cit. 2015-24-04]. Dostupné z: <http://www.stage.slm-solutions.com/download.php?f=3dfab3a83fecdda43db4c3cee5f15ada>
- [3] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2014, 1-4, s. 77-86. DOI:10.1016/j.addma.2014.08.001. ISSN 22148604.
- [4] ZIÓŁKOWSKI, G., E. CHLEBUS, P. SZYMCZYK a J. KURZAC. Application of X-ray CT method for discontinuity and porosity detection in 316L stainless steel parts produced with SLM technology. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2014, vol. 14, issue 4, s. 608-614. DOI: 10.1016/j.acme.2014.02.003. ISSN 16449665.
- [5] SCHULZE, Günter. *Die Metallurgie des Schweissens Eisenwerkstoffe - nichteisenmetallische Werkstoffe*. 4., neu bearbeitete Aufl. Heidelberg: Springer, 2010. ISBN 9783642031830.
- [6] KARG, M, B AHUJA a M SCHMIDT. Processability of high strength Aluminium-Copper alloys AW-2022 and 2024 by Laser Beam Melting in Powder Bed. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2014, s. 420–436.
- [7] ZHANG, Hu, Haihong ZHU, Ting QI, Zhiheng HU a Xiaoyan ZENG. Selective laser melting of high strength Al–Cu–Mg alloys: Processing, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 656, s. 47–54. DOI:10.1016/j.msea.2015.12.101. ISSN 09215093.
- [8] AHUJA, Bhriugu, Michael KARG, Konstantin Yu. NAGULIN a Michael SCHMIDT. Fabrication and Characterization of High Strength Al-Cu Alloys Processed Using Laser Beam Melting in Metal Powder Bed. *Physics Procedia*. 2014, roč. 56, s. 135–146. DOI:10.1016/j.phpro.2014.08.156. ISSN 4991318564.
- [9] KOUTNÝ, Daniel, David PALOUŠEK, Ondřej KOUKAL, Tomáš ZIKMUND a Libor PANTĚLEJEV. Processing of High Strength Al-Cu alloy Using 400W Selective Laser Melting – Initial Study. In: *Lasers in Manufacturing Conference 2015*. Mnichov: WLT, 2015.
- [10] KOUKAL, Ondřej, Daniel KOUTNÝ, David PALOUŠEK, Radek VRÁNA, Tomáš ZIKMUND a Libor PANTĚLEJEV. Research about the Influence of Process Parameters of Selective Laser Melting on Material EN AW 2618. In: *Proceedings of Euro PM 2015*. Remeš: EPMA, 2015. ISBN 978-1-899072-47-7.
- [11] *SLM 280 HL* [online]. [cit. 2016-9-11]. Dostupné z: http://enicon.org/promyishlennyye/slm_280hl

- [12] DOKOUPIL, F. *Zpracování slitiny 2618 pomocí technologie selective laser melting*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 123 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. David Paloušek, Ph.D..
- [13] ALS ENVIROMENTAL. INDUCTIVELY COUPLED PLASMA-ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY. USA, 1996. Dostupné z: <http://www.caslab.com/EPA-Methods/PDF/EPA-Method-6010B.pdf>
- [14] ČSN EN 573-1. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 1: Číselné označování*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [15] ČSN EN 573-3. *Hliník a slitiny hliníku - Chemické složení a druhy tvářených výrobků - Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014
- [16] Horiba Scientific. In: *LA-960 Laser Particle Size Analyzer* [online]. 1996 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.horiba.com/>
- [17] POYRAZ, O, E. YASA, G. AKBULUT, A. ORHANGÜL a S. PILATIN. Investigation of support structures for direct metal laser sintering (DMLS) of IN625 parts. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2015, s. 560-574.
- [18] *High temp. substrate plate* [online]. SLM Solutions [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: https://slm-solutions.com/sites/default/files/attachment/page/2016/11/w_hth_en.pdf
- [19] DAI, Donghua a Dongdong GU. Applied Surface Science Effect of metal vaporization behavior on keyhole-mode surface morphology of selective laser melted composites using different protective atmospheres. *Applied Surface Science*. 2015, roč. 355, s. 310–319. ISSN 0169-4332. doi:10.1016/j.apsusc.2015.07.044
- [20] *Datasheet EN AW 5083* [online]. ASM Aerospace specification Metals [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA5083H116>
- [21] CEITEC. In: *Laboratoř rentgenové tomografie* [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.ceitec.cz/ctlab>
- [22] *Zwick Z250* [online]. Zwick Roell [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.zwick.com/news/allroundline-z250-with-side-test-area>
- [23] YASA, Evren., Jan DECKERS, Tom CRAEGHS, Mohsen BADROSSAMAY a Jean-Pierre KRUTH. Investigation on occurrence of elevated edges in selective laser melting. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2009, s. 673-685.
- [24] CESCHINI, L., et al. Effect of thermal exposure on the residual hardness and tensile properties of the EN AW-2618A piston alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 639, no. 7, p. 228-297. DOI: [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(93\)90045-W](https://doi.org/10.1016/0261-3069(93)90045-W)

- [25] DIN 50125. Testing of metallic materials - tensile test pieces. [online]. Deutsche norm [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.seven-diamonds.com/media/pdf/standards/13.pdf>
- [26] HATCH, John E. *Aluminum: properties and physical metallurgy*. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, c1984. ISBN 9780871701763.
- [27] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2011, Vol. 211, issue 2, s. 275-284 [cit. 2017-05-17]. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013610003018>
- [28] OLAKANMI. E.O, R.F. COCHRANE, K.W. DALGARMO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties, *Progress in Materials Science*. 74 (2015) s. 401–477. doi:10.1016/j.pmatsci.2015.03.002.zt

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**Zkratka Význam**

3D	Trojrozměrný
CAD	Computer Aided Desing
CEITEC	Central European Institute of Technology
CNC	Computer numerical control
CT	Computed Tomography
ČSN	Česká soustava norem
DIN	Deutsches Institut für Normung
GAČR	Grantová agentura České republiky
GE	General Electric
HV	Hardness Vickers
ICP-OES	Inductively coupled plasma - Optical emission spectrometry
IPA	Iso Propyl Alkohol
SLM	Selective laser melting
STL	Standard Tessalation Language
μCT	Mikro Computed Tomography

Symbol	Jednotka	Popis
L_P	(W)	výkon laseru
L_s	(mm/s)	skenovací rychlost
L_t	(μm)	tloušťka vrstvy
H_d	(μm)	šrafovací vzdálenost
T_P	(°C)	teplota stavební platformy
Ψ	(J/mm ³)	objemová hustota energie
R_d	(%)	relativní hustota
Φ	(%)	porozita
E	(MPa)	modul pružnosti v tahu
Re	(MPa)	mez kluzu v tahu
$R_{p0,2}$	(MPa)	smluvní mez kluzu v tahu
R_m	(MPa)	mez pevnosti v tahu
A	(%)	tažnost
Z	(%)	zúžení

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 a) Díl vyroben konvenčními metodami b) Díl vyroben pomocí SLM [1]	13
Obr. 2-1 Schématické znázornění principu SLM [4]	14
Obr. 2-2 Tabulka procesních parametrů [3] (upraveno)	15
Obr. 2-3 Přehled procesních parametrů	16
Obr. 2-4 a) Metalurgické póry b) „Keyhole“ póry [3]	16
Obr. 2-5 a) Snímek z CT b) Snímek výbrusu [4]	17
Obr. 2-6 Závislost relativní hustoty na skenovací strategii a rychlosti [3]	18
Obr. 2-7 Závislost pravděpodobnosti výskytu prasklin na obsahu legujících prvků při svařování [5] (upraveno)	19
Obr. 2-8 Vlevo – vzorek vyrobený bez podpor, Vpravo – vzorek vyrobený na podporách [6]	20
Obr. 2-9 Graf závislosti relativní hustoty na objemové hustotě energie [7]	20
Obr. 2-10 Výsledky zkoušek mechanických vlastností [7]	21
Obr. 2-11 AW 2618 – závislost relativní hustoty na objemové hustotě energie [8]	21
Obr. 2-12 Vyhodnocení single track testů [9]	22
Obr. 2-13 Snímky z CT, Horní hodnota – relativní hustota, Spodní hodnota – hustota energie [10] (upraveno)	22
Obr. 4-1 Výrobní zařízení SLM 280 HL [11] (upraveno)	25
Obr. 4-2 Stavěcí komora [12] (upraveno)	25
Obr. 4-3 Práškový materiál EN AW 2618	26
Obr. 4-4 Upravená platforma a nanášecí zařízení	28
Obr. 4-5 Schéma nastavení strategie stavby návarů	28
Obr. 4-6 Graf závislosti teploty platformy na čase výhřevu [12]	29
Obr. 4-7 Rozložení vzorků na platformě	30
Obr. 4-8 Objemové vzorky 13x13 mm	30
Obr. 4-9 Postup obrazové analýzy v softwaru ImageJ	31
Obr. 4-10 Vzorek analyzovaný pomocí μ CT	32
Obr. 5-1 SEM snímek morfologie částic	33
Obr. 5-2 Graf frekvenční a distribuční křivky	35
Obr. 5-3 a) Platforma s ručně nanesenou vrstvou, b) Ručně nanesená vrstva (8x zoom)	36
Obr. 5-4 Detail na nanesenou vrstvu (56x Zoom)	36
Obr. 5-5 Prvotní návarový test	37
Obr. 5-6 Srovnání šířek zkušebních návarů	37
Obr. 5-7 Grafy srovnání jednotlivých staveb testu ručního nanášení.	38
Obr. 5-8 První sada návarů	38
Obr. 5-9 a) Návary po dokončení stavby, b) Metalografický vzorek návarů	39
Obr. 5-10 Procesní mapa návarů (první sada)	39
Obr. 5-11 Zástupce oblasti 1 (Návar č. 41)	40
Obr. 5-12 Zástupce oblasti 2 (Návar č. 80)	40
Obr. 5-13 Zástupce oblasti 3 (Návar č. 11)	40
Obr. 5-14 Zástupce vyšších rychlostí (Návar č. 100)	41
Obr. 5-15 Druhá sada návarů	41
Obr. 5-16 Procesní mapa návarů (druhá sada)	42
Obr. 5-17 Zástupce oblasti 3 (vzorek 63)	42
Obr. 5-18 Znázornění měřených veličin na návaru	43

Obr. 5-19 Graf závislosti velikosti šířky návaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru	43
Obr. 5-20 Graf závislosti velikosti výšky návaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru	44
Obr. 5-21 Srovnání návaru původního a opakovaného experimentu	45
Obr. 5-22 Graf závislosti velikosti hloubky průvaru na skenovací rychlosti a výkonu laseru	45
Obr. 5-23 Experiment zvětšujících se vzorků při stavbě	46
Obr. 5-24 Výbrusy zvětšujících se vzorků	46
Obr. 5-25 Graf závislosti relativní hustoty na délce strany vzorku	47
Obr. 5-26 Vzorek s naznačením skenovací strategie „Meander“	47
Obr. 5-27 Chessboard strategie	48
Obr. 5-28 Graf závislosti relativní hustoty na velikosti mezery mezi poli	48
Obr. 5-29 Srovnání relativní hustoty vzorků s a bez mezery mezi poli	49
Obr. 5-30 Postup skenování polí strategie „Chessboard“	49
Obr. 5-31 Srovnání běžného postupu skenování s nastavením „Out in spiral“	50
Obr. 5-32 Srovnání vzorků s různou velikostí pole	50
Obr. 5-33 Strategie „Hull and Core“	51
Obr. 5-34 Graf závislosti relativní hustoty vzorku na výkonu laseru	51
Obr. 5-35 Srovnání vzorků „Hull and Core“	52
Obr. 5-36 Srovnání naměřených relativních hustot pro broušené a leštěné vzorky	52
Obr. 5-37 Srovnání broušeného a leštěného vzorku	53
Obr. 5-38 Grafy závislosti relativní hustoty na skenovací rychlosti	53
Obr. 5-39 Závislost relativní hustoty na výkonu laseru	54
Obr. 5-40 Výskyt trhlin na hraních oblastí	55
Obr. 5-41 Graf závislosti relativní hustoty na objemové hustotě energie	55
Obr. 5-42 Graf závislosti relativní hustoty na výkonu laseru pro „Pre-sintering“	56
Obr. 5-43 Srovnání vzorků „Pre-sintering“ experimentu	57
Obr. 5-44 Blokované podpory	57
Obr. 5-45 Výkres objemového vzorku pro podpůrné struktury	58
Obr. 5-46 První stavba s podpůrnou strukturou	58
Obr. 5-47 Podpory typu „Cone“	59
Obr. 5-48 Druhá stavba s podpůrnou strukturou	59
Obr. 5-49 Umístění vzorků na platformě	60
Obr. 5-50 Srovnání vzorků na podpůrných strukturách „Meander“	60
Obr. 5-51 Srovnání vzorků na podpůrných strukturách „Chessboard“	61
Obr. 5-52 Graf závislosti relativní hustoty na skenovací rychlosti pro různé šrafovací vzdálenosti	61
Obr. 5-53 Znázornění přesahu návarů (nízké rychlosti)	62
Obr. 5-54 Znázornění přesahů návarů (vysoké rychlosti)	62
Obr. 5-55 a) Trhliny se šíří všemi směry b) Trhliny se šíří jedním směrem	63
Obr. 5-56 Stavební komora s vysokoteplotní jednotkou	64
Obr. 5-57 Výsledek experimentu s výhřevem platformy na 400 °C	65
Obr. 5-58 Srovnání povrchu vzorků s různou teplotou výhřevu	66
Obr. 5-59 Srovnání vzorků strategie „Chessboard“ (80-300 mm/s)	67
Obr. 5-60 Srovnání vzorků strategie „Chessboard“ (1300-1400 mm/s)	67
Obr. 5-61 Srovnání vzorků strategie „Meander“ (100-300 mm/s)	68
Obr. 5-62 Srovnání vzorků strategie „Meander“ (1300-1400 mm/s)	68

Obr. 5-63 Tahové diagramy referenčního materiálu	69
Obr. 5-64 a) Válcový polotovár b) Hranol se čtvercovou podstavou	70
Obr. 5-65 a) Válcové polotovary b) Obrobené vzorky	70
Obr. 5-66 Tahový diagram strategie „Meander“ a „Chessboard“ (Válcový polotovár)	71
Obr. 5-67 μ CT analýza, strategie „Meander“ a „Chessboard“	72
Obr. 5-68 Schéma rozložení vzorků na platformě	72
Obr. 5-69 Tahový diagram experimentů s pozicí vzorků na platformě	73
Obr. 5-70 Tahový diagram experimentů se strategií „Remelting“	74
Obr. 5-71 Tahový diagram strategie „Meander“ (kvádrový polotovár)	75
Obr. 5-72 Tahový diagram pro strategii „Hull and Core“	75
Obr. 5-73 Polotovary pro ploché vzorky	76
Obr. 5-74 Tahový diagram pro ploché vzorky	76
Obr. 5-75 Tahový diagram vzorku na podpůrných strukturách.	77
Obr. 5-76 Referenční materiál a) směr příčný b) směr podélný	78
Obr. 5-77 SLM materiál a) směr příčný b) směr podélný	78
Obr. 5-78 Detailní pohled na SLM mikrostrukturu a) směr příčný b) směr podélný	79
Obr. 5-79 Lomové plochy a) tvářený materiál b) SLM materiál	80
Obr. 5-80 a) Lomová plocha tvářený vzorek b) Lomová plocha SLM vzorek	80
Obr. 5-81 a) Částice intermediální fáze b) Nenatavená částice prášku uvnitř póru	80
Obr. 6-1 Trhliny ve vzorku strategie „Remelting“	82
Obr. 6-2 Oxidická vrstva na povrchu póru	83
Obr. 6-3 Princip vzniku oxidačních inkluzí a) Marangoniho efekt b) tuhnutí lázně [26] (upraveno)	84
Obr. 6-4 Ukázka hrubého povrchu vzorků	84
Obr. 6-5 Nerovnoměrná vrstva prášku na hrubém povrchu	85
Obr. 6-6 Solidifikační trhliny v mikrostruktuře	85

11SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Chemické složení slitin EN AW 2618	18
Tab. 4-1 Specifikace zařízení SLM 280 HL	24
Tab. 5-1 Srovnání chemického složení	34
Tab. 5-2 Výsledky analýzy distribuce velikosti částic	34
Tab. 5-3 Srovnání distribuce částic nového a původního práškového materiálu	35
Tab. 5-4 Srovnání návaru stejných parametrů	42
Tab. 5-5 Přehled výsledku referenčního materiálu	69
Tab. 5-6 Přehled výsledků strategie „Meander“ a „Chessboard“ (Válcový polotovar)	71
Tab. 5-7 Přehled výsledků experimentu s pozicí vzorků na platformě	73
Tab. 5-8 Průměr výsledků tahové zkoušky pro strategii „Remelting“	74
Tab. 5-9 Výsledky tahové zkoušky strategie „Meander“ (kvádrový polotovar)	74
Tab. 5-10 Průměrná hodnota výsledků tahové zkoušky pro strategii „Hull and Core“	75
Tab. 5-11 Výsledky tahové zkoušky pro ploché vzorky	76
Tab. 5-12 Výsledky tahové zkoušky pro vzorek na podpůrných strukturách	77
Tab. 5-13 Výsledky měření tvrdosti	79

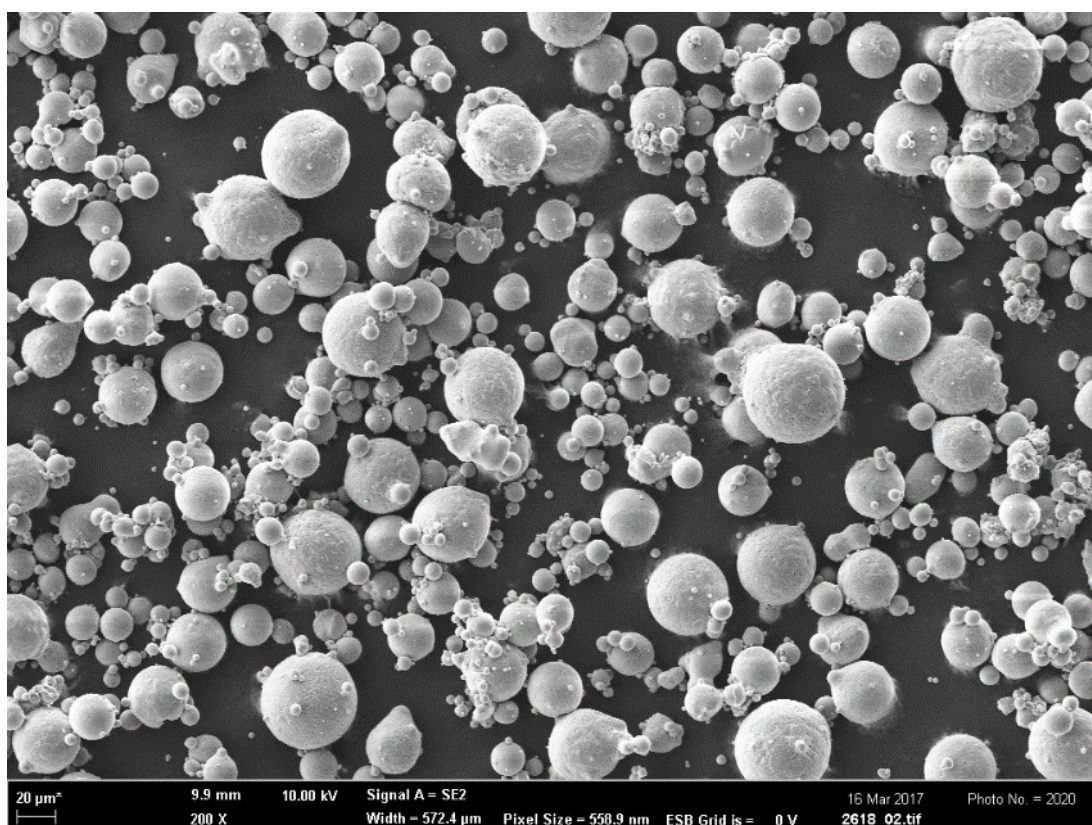
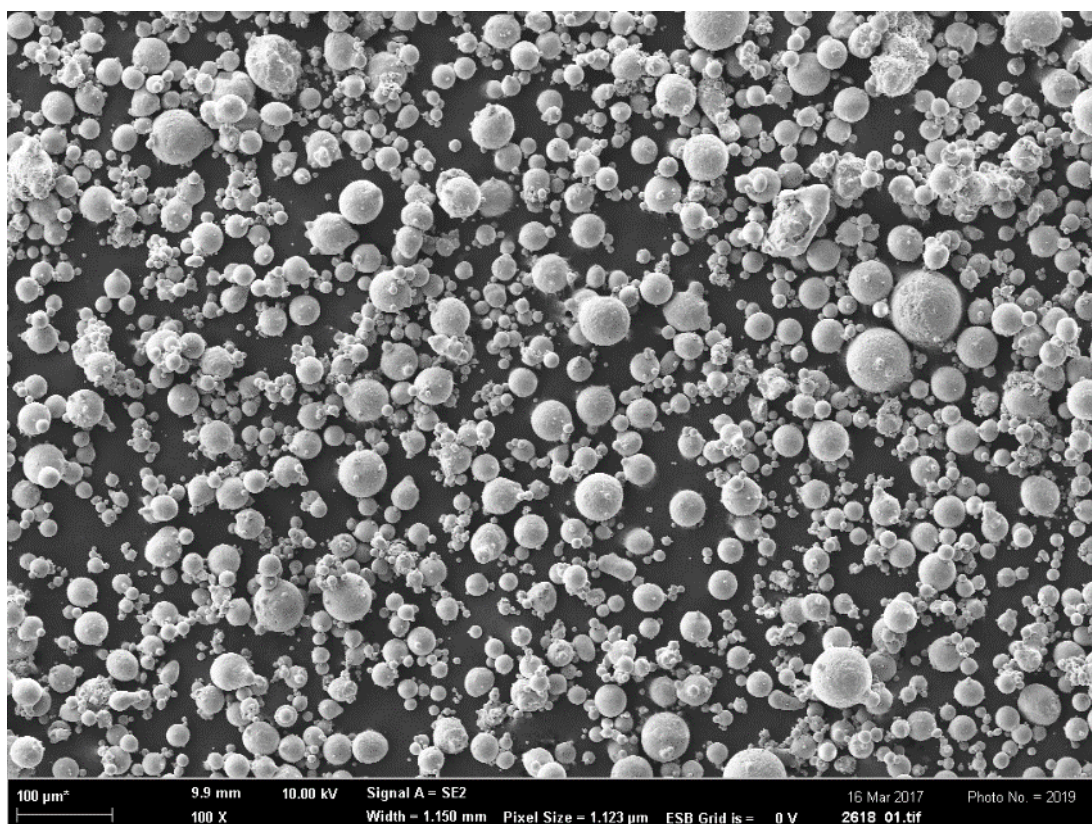
12SEZNAM PŘÍLOH**12**

Příloha 1 SEM snímky částic práškového materiálu	96
Příloha 2 Protokol analýzy chemické složení	98
Příloha 3 Protokol z měření distribuce velikosti částic	99
Příloha 4 Přehled snímků 1. sady návarů	100
Příloha 5 Přehled snímků 2. sady návarů	102
Příloha 6 Přehled snímku strategie „Chessboard“	104
Příloha 7 Přehled snímku strategie „Pre-sintering“	105
Příloha 8 Přehled snímků experiment s výhřevem platformy	106
Příloha 9 Protokol z tahové zkoušky	108

Příloha 10 Publikace

13PŘÍLOHY

Příloha 1 SEM snímky částic práškového materiálu





Příloha 2 Protokol analýzy chemické složení



Assoc. Prof. **Karel Novotný** Ph.D.
Department of Chemistry
Laboratory of Atomic Spectrochemistry
Faculty of Science, Masaryk University
Kotlářská 2, CZ 611 37 Brno
Tel.: 549 49 6231
e-mail: codl@sci.muni.cz

Assoc. Prof. **David Paloušek**, Ph.D.

Institute of Machine and Industrial Design
Dept. of Reverse Engineering
and Additive Technologies

Faculty of Mechanical Engineering,
Brno University of Technology

Upon your request, we send you the results of spectrochemical analysis of powdered aluminum sample:

Sample preparation procedure: About 0.2 g of material of the sample was weighed and 5 ml of nitric acid and 20 ml distilled water was added in a 50 ml beaker to the sample and after covering with a watch glass was then heated to boiling point for 10 minutes. After this time 0.2 ml of 30% hydrogen peroxide was added and the mixture was refluxed for additional 10 minutes. Blank was prepared by the same procedure. After cooling the mixture was diluted with double-distilled water to 100 ml volume. The solution was then diluted and used for spectrochemical analysis by the spectrometer with inductively coupled plasma ICP-OES Thermo iCAP 6500.

Measurements:

The measurement was performed by radial plasma view mode with integration time 5 s and 3 repetitions. Calibration solutions ASTASOL[®] was used for calibration for measurement on following emission lines: Cu 324.7 nm, Fe 238.2 nm, Mg 280.2 nm, Ni 221.6 nm, Si 252.8 nm, Ti 323.4 nm, Al 309.2 nm.

Results:

Cu	Fe	Mg	Ni	Si	Ti	Al
2.66	1.00	1.39	1.22	0.149	0.206	93.375

The results are given in percentage by weight - (m/m)

20.3.2015

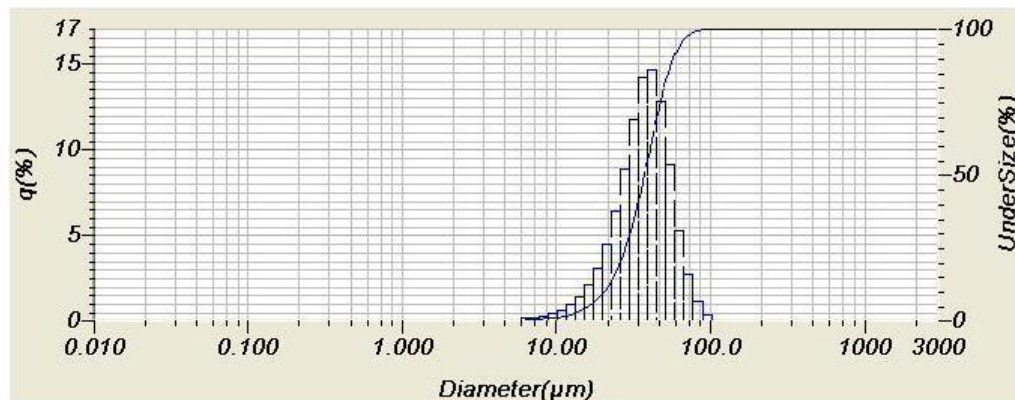
Assoc. Prof. Karel Novotný Ph.D.

Příloha 3 Protokol z měření distribuce velikosti částic

2015.10.29 11:59:18

HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyze

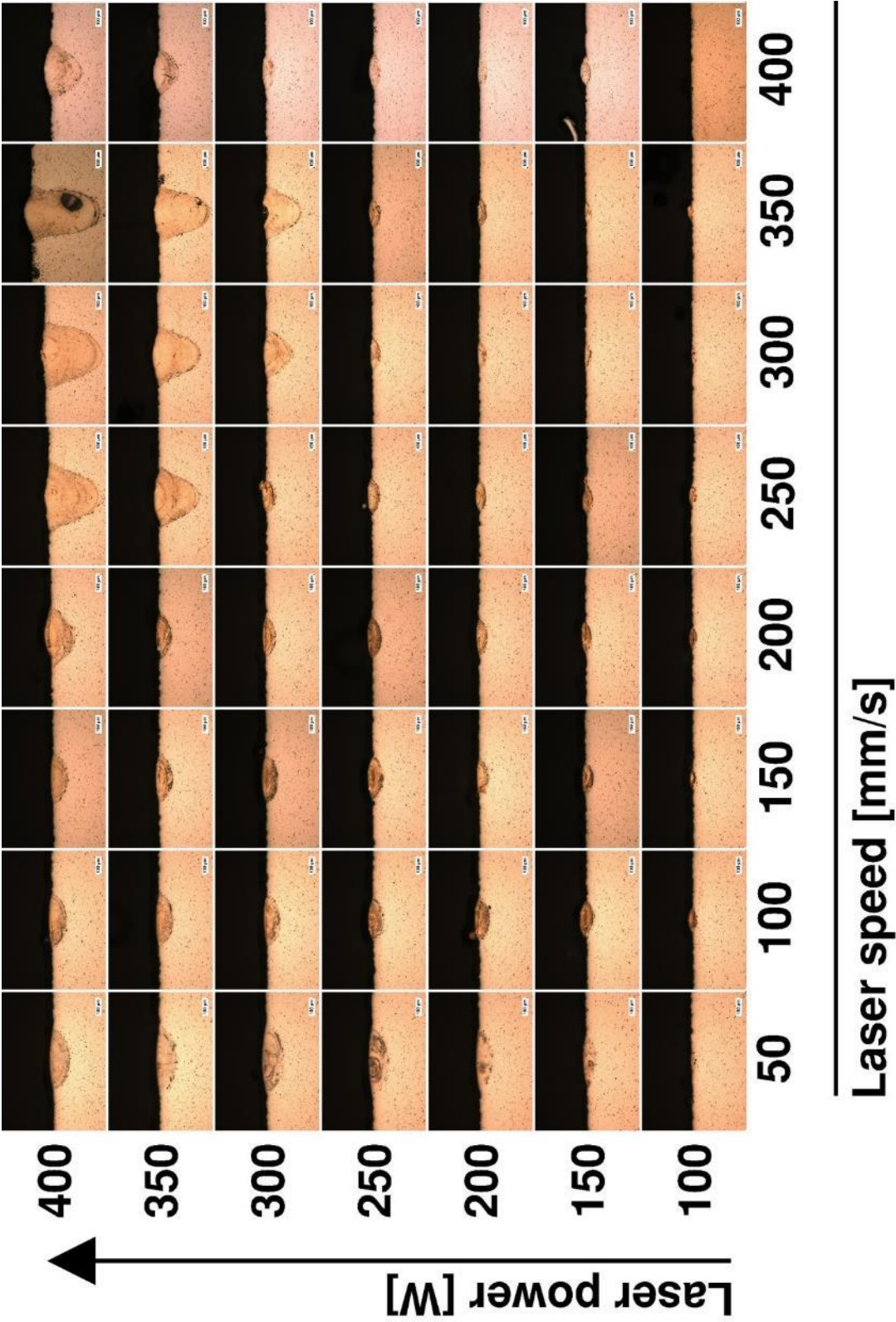
Sample Name	: ocel nástrojová	Median Size	: 37.62033(μm)
ID#	: 201510291123111	Mean Size	: 38.86407(μm)
Data Name	: 2618 10-2015_2_1minUS	Std.Dev.	: 14.8608(μm)
Transmittance(R)	: 64.9(%)	Geo.Mean Size	: 35.8679(μm)
Transmittance(B)	: 75.3(%)	Geo.Std.Dev.	: 1.5214(μm)
Circulation Speed	: 4	Mode Size	: 41.7095(μm)
Agitation Speed	: 5	Span	: OFF
Ultra Sonic	: 01:00 (7)	Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 20.6074(μm)
Form of Distribution	: Auto		: (9)90.00 (%) - 58.2488(μm)
Distribution Base	: Volume		
Refractive Index (R)	: Iron[Iron(3.500 - 3.800i).Water(1.333)]		
Refractive Index (B)	: Iron[Iron(3.500 - 3.800i).Water(1.333)]		
Material	: ocel		
Source	:		

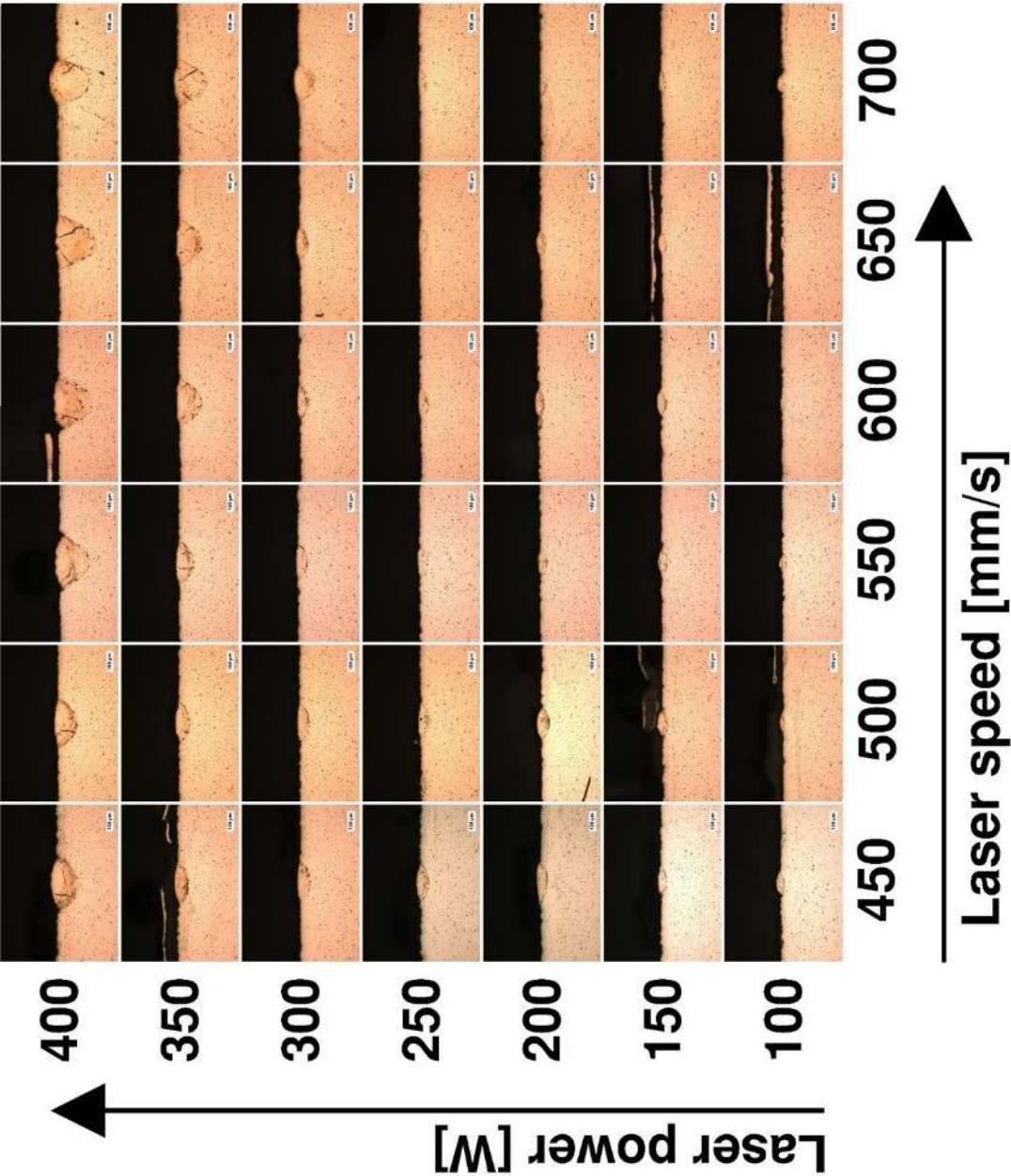


No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	No.	Diameter(μm)	q(%)	UnderSize(%)	N
1	0.011	0.000	0.000	20	0.180	0.000	0.000	39	1.981	0.000	0.000	58	25.111	6.363	19.665	7
2	0.013	0.000	0.000	21	0.172	0.000	0.000	40	2.269	0.000	0.000	59	29.907	8.846	28.511	7
3	0.015	0.000	0.000	22	0.197	0.000	0.000	41	2.599	0.000	0.000	60	34.255	11.707	40.219	7
4	0.017	0.000	0.000	23	0.226	0.000	0.000	42	2.976	0.000	0.000	61	39.234	14.166	54.384	8
5	0.020	0.000	0.000	24	0.259	0.000	0.000	43	3.409	0.000	0.000	62	44.938	16.613	68.998	8
6	0.022	0.000	0.000	25	0.296	0.000	0.000	44	3.905	0.000	0.000	63	51.471	12.725	81.723	8
7	0.025	0.000	0.000	26	0.339	0.000	0.000	45	4.472	0.000	0.000	64	58.953	9.081	90.804	8
8	0.029	0.000	0.000	27	0.389	0.000	0.000	46	5.122	0.000	0.000	65	67.623	5.192	95.996	8
9	0.034	0.000	0.000	28	0.445	0.000	0.000	47	5.867	0.000	0.000	66	77.339	2.630	98.626	8
10	0.039	0.000	0.000	29	0.510	0.000	0.000	48	6.720	0.107	0.107	67	88.283	1.057	99.683	8
11	0.044	0.000	0.000	30	0.584	0.000	0.000	49	7.697	0.164	0.270	68	101.460	0.317	100.000	8
12	0.051	0.000	0.000	31	0.669	0.000	0.000	50	8.816	0.252	0.522	69	116.210	0.000	100.000	8
13	0.058	0.000	0.000	32	0.766	0.000	0.000	51	10.097	0.367	0.910	70	133.103	0.000	100.000	8
14	0.067	0.000	0.000	33	0.877	0.000	0.000	52	11.565	0.593	1.503	71	152.453	0.000	100.000	9
15	0.076	0.000	0.000	34	1.005	0.000	0.000	53	13.246	0.904	2.406	72	174.616	0.000	100.000	9
16	0.087	0.000	0.000	35	1.151	0.000	0.000	54	15.172	1.368	3.775	73	200.000	0.000	100.000	9
17	0.100	0.000	0.000	36	1.318	0.000	0.000	55	17.377	2.051	5.825	74	229.075	0.000	100.000	9
18	0.115	0.000	0.000	37	1.510	0.000	0.000	56	19.904	3.038	8.863	75	262.376	0.000	100.000	
19	0.131	0.000	0.000	38	1.729	0.000	0.000	57	22.797	4.439	13.302	76	300.518	0.000	100.000	

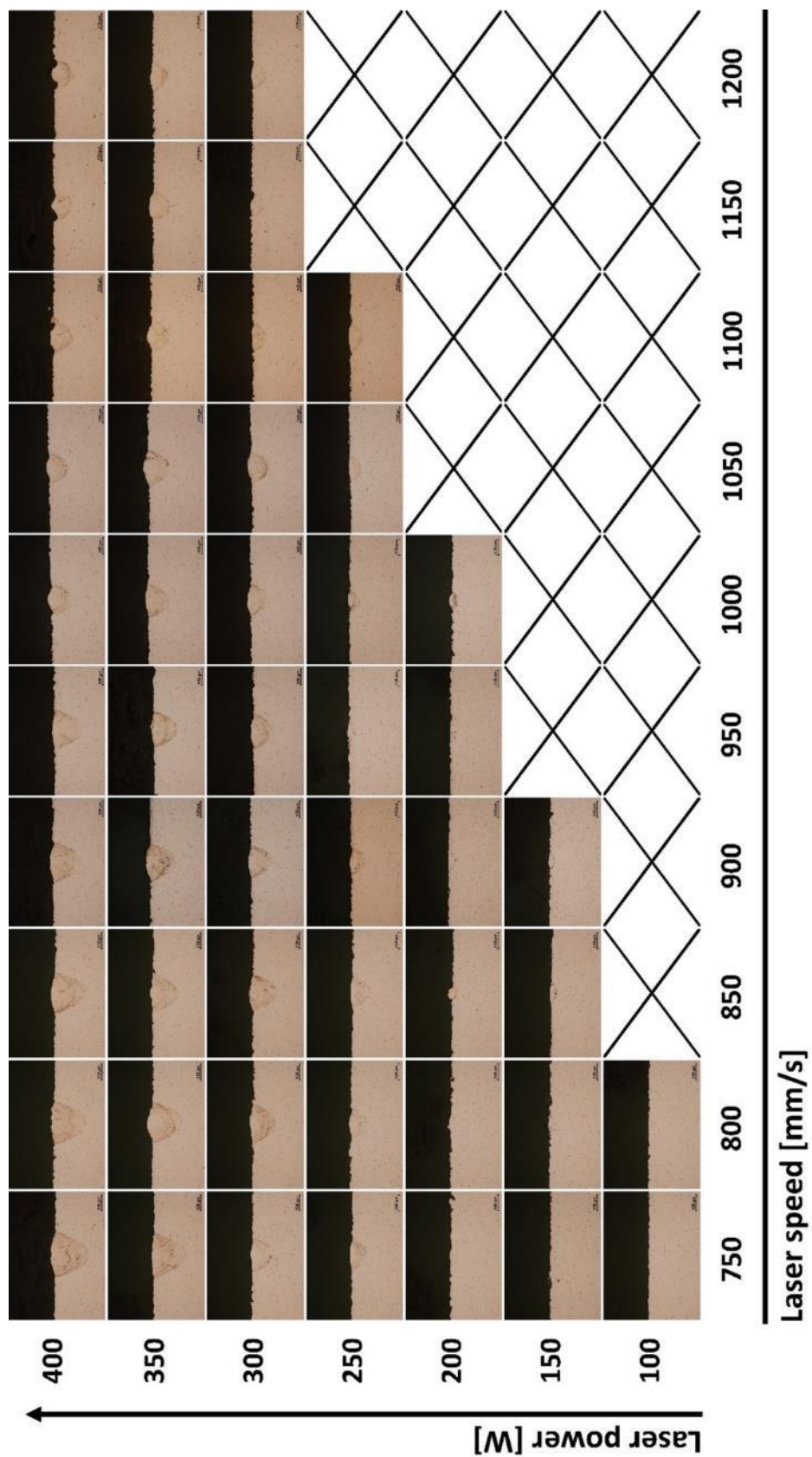
1 / 1

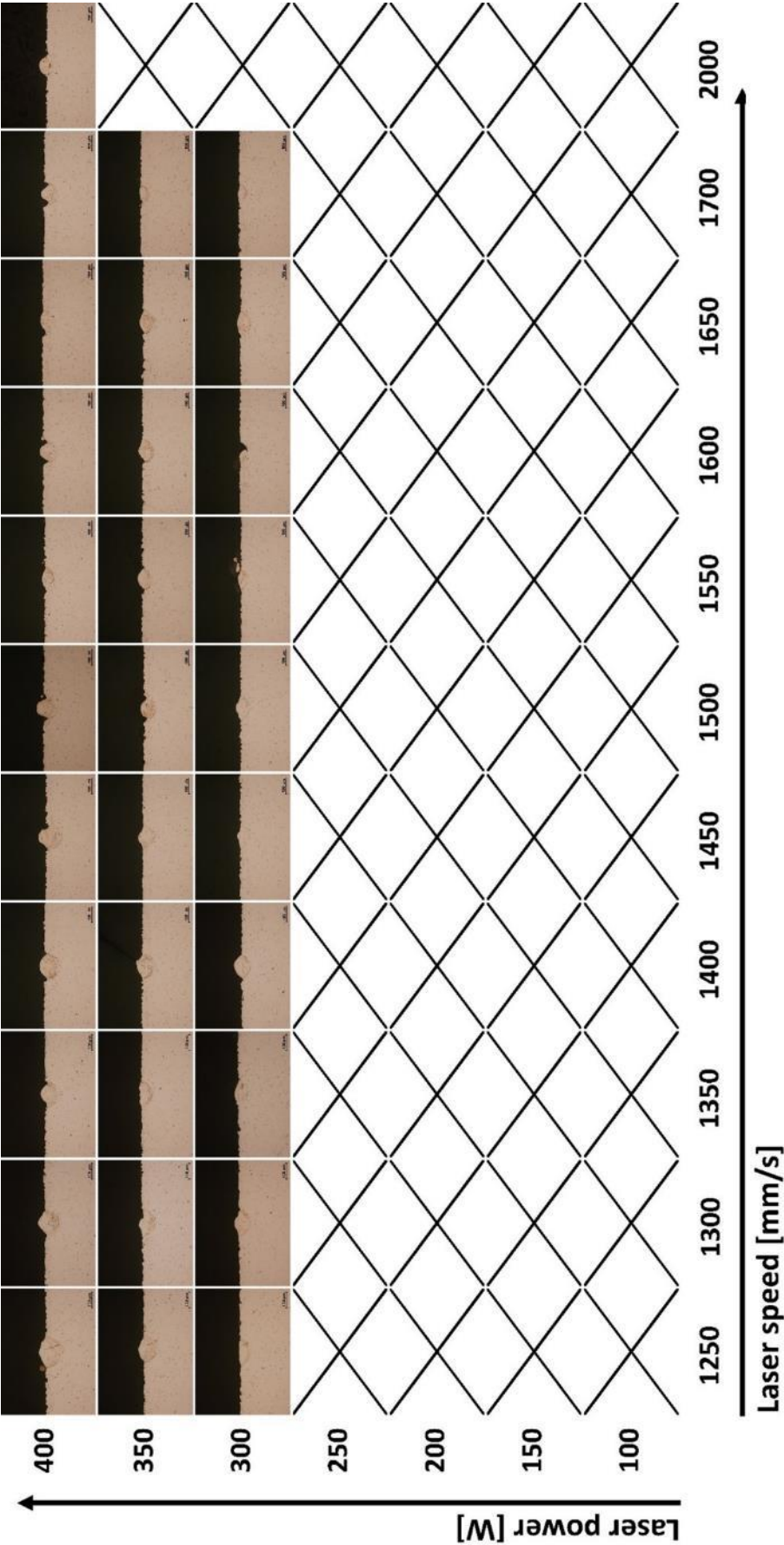
Příloha 4 Přehled snímků 1. sady návarů



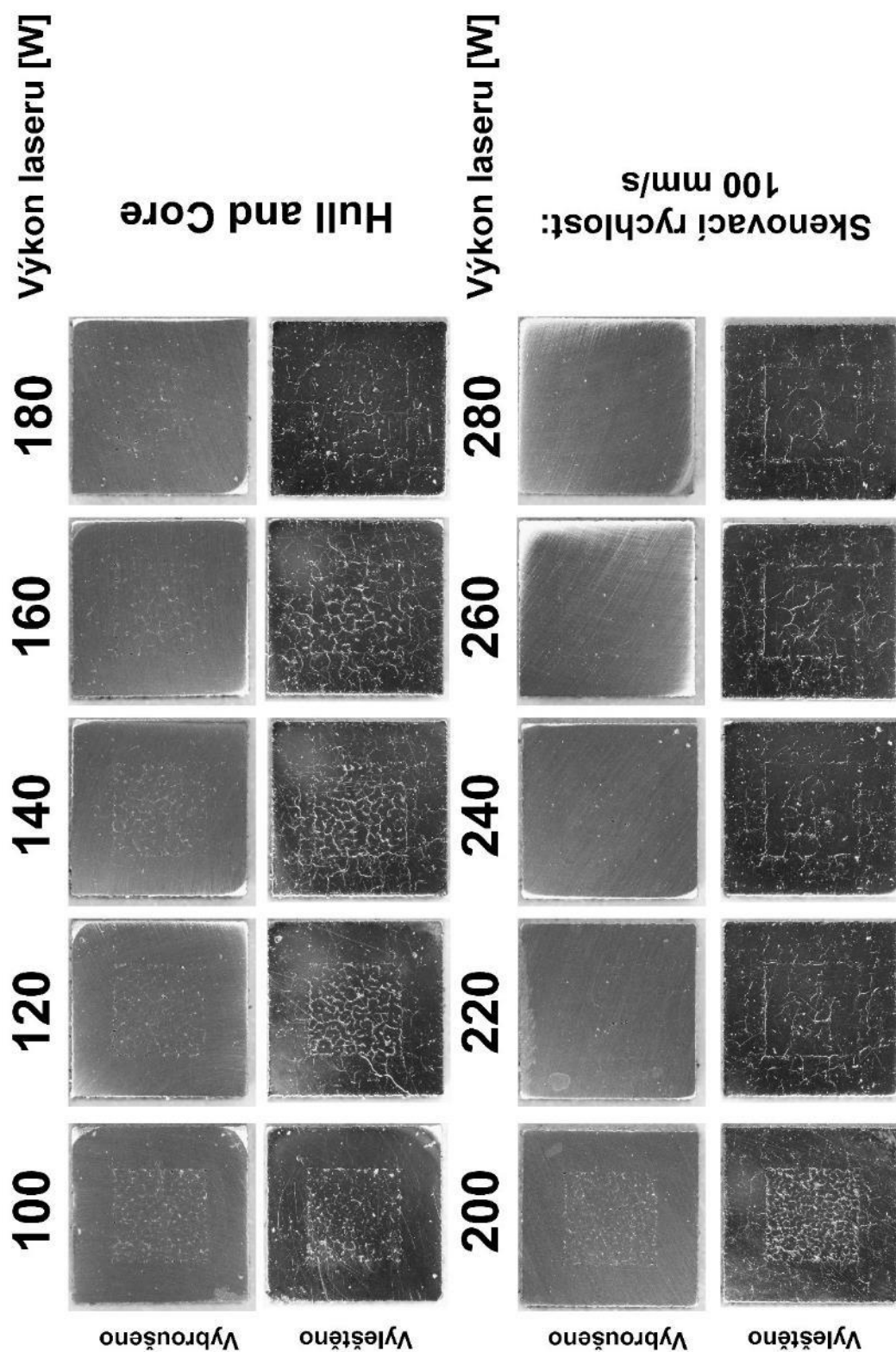


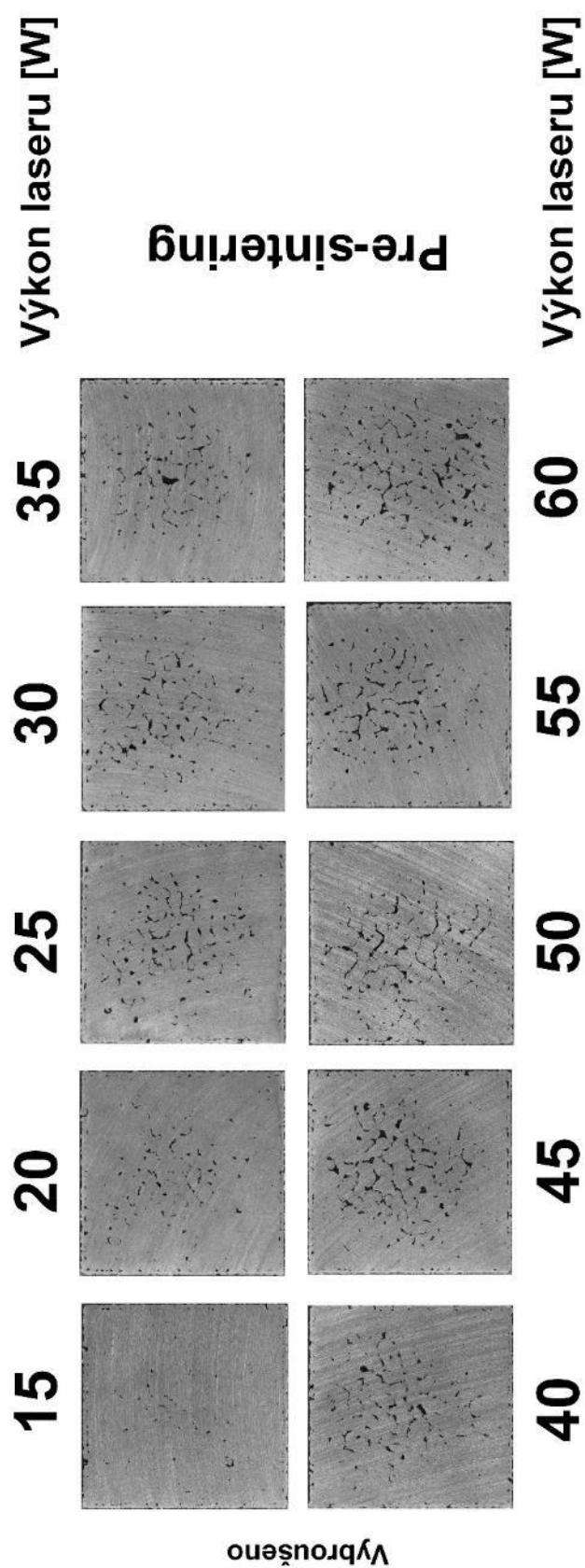
Příloha 5 Přehled snímků 2. sady návarů




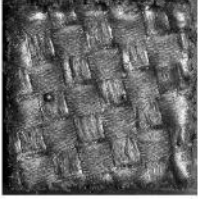
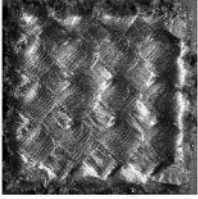
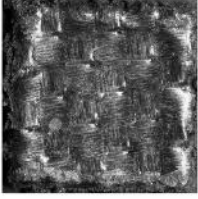

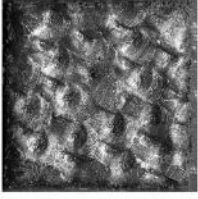

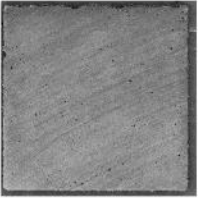
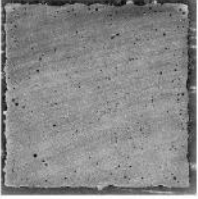
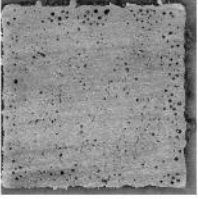
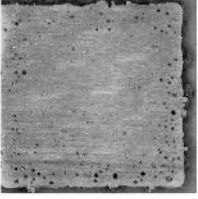
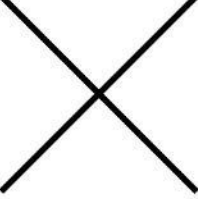
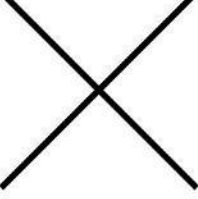
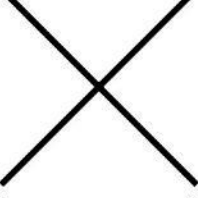

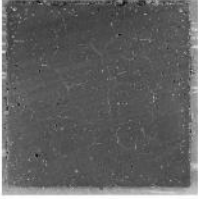
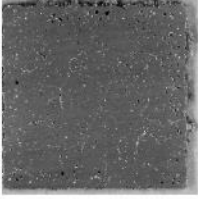
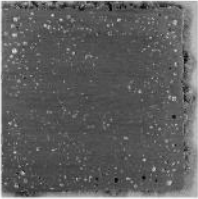
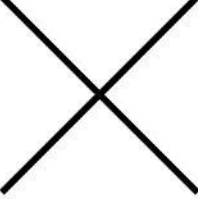
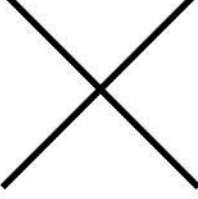
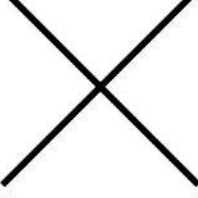
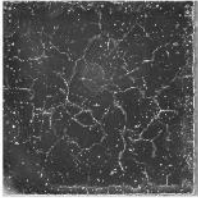
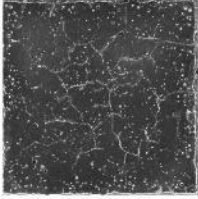
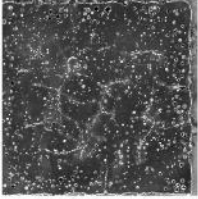
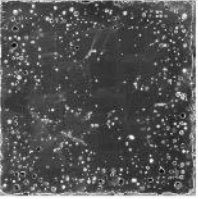
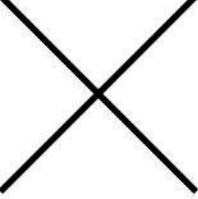
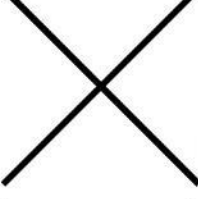
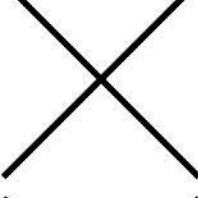


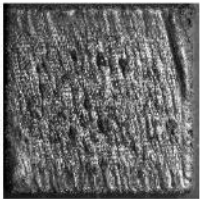
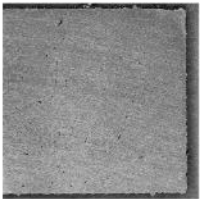
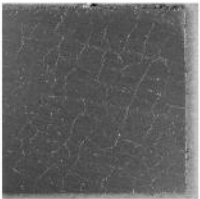
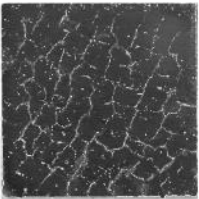
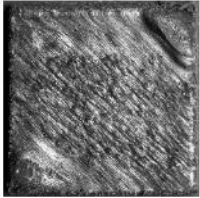
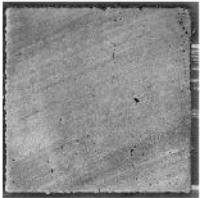

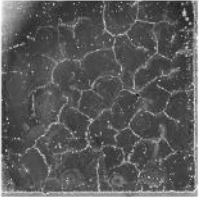
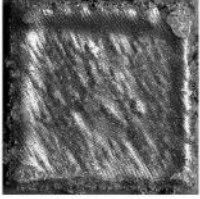
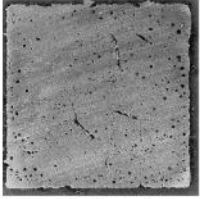
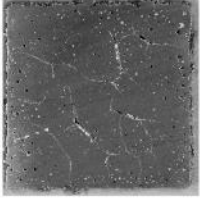
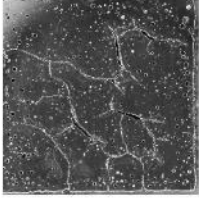
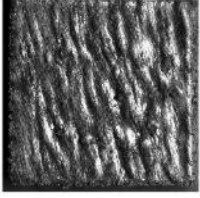
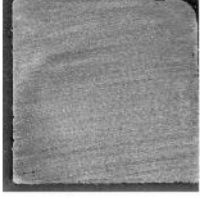

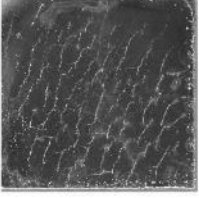
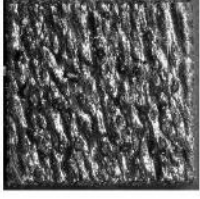


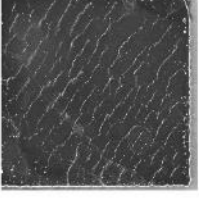
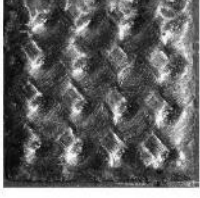

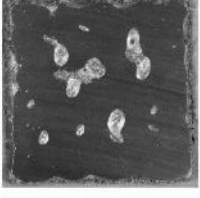
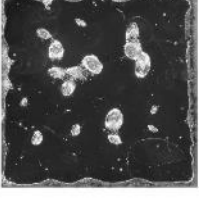

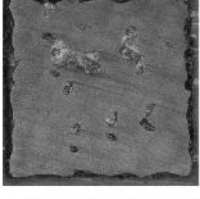
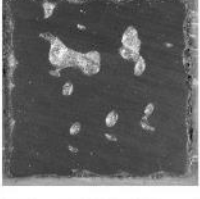
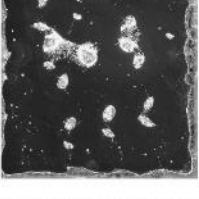
Příloha 6 Přehled snímku strategie „Chessboard“



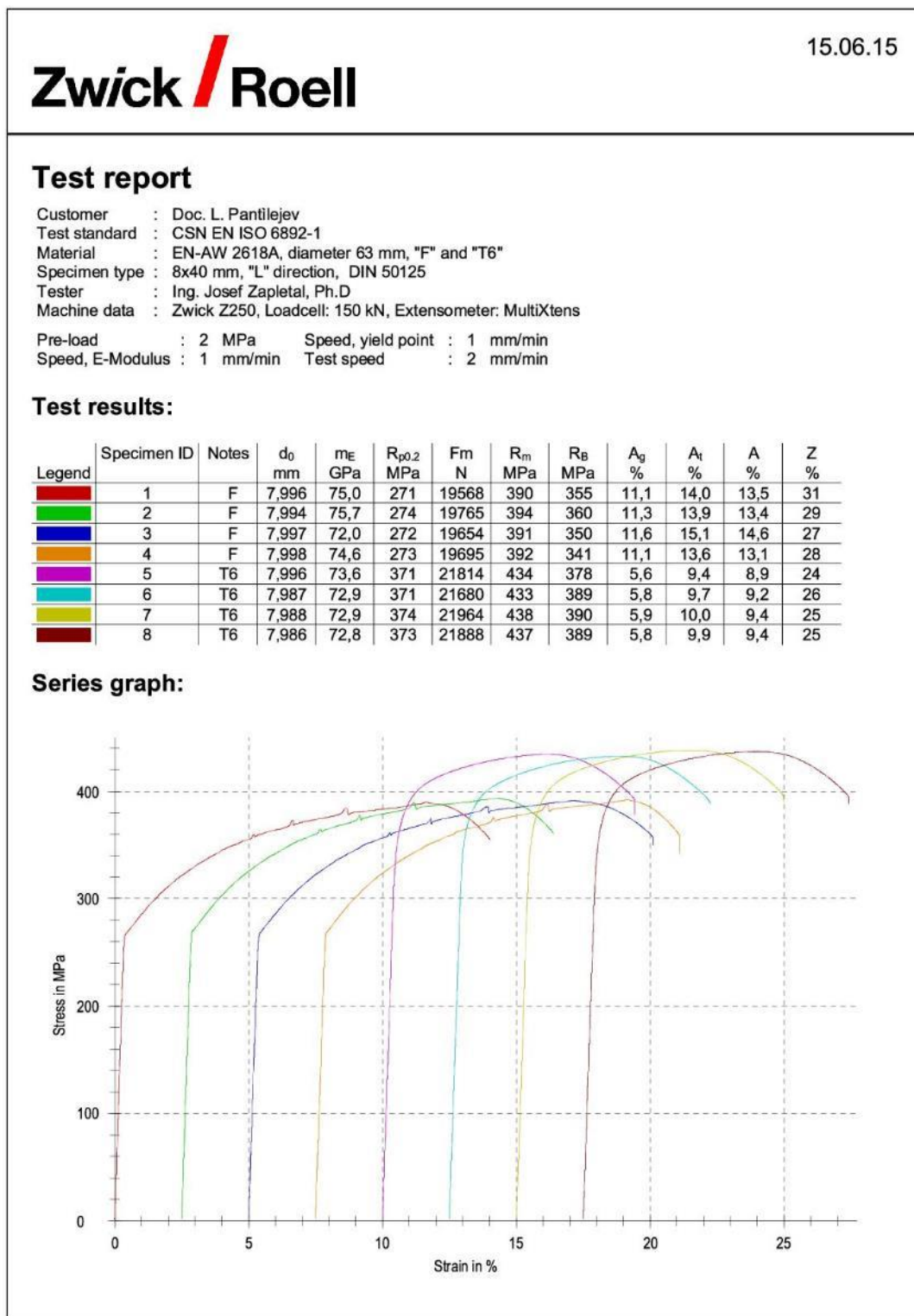
Příloha 7 Přehled snímku strategie „Pre-sintering“

Příloha 8 Přehled snímků experiment s výhřevem platformy

	1	2	3	4	5	6	7
Povrch							
Vybroušeno plně světlo							
Vybroušeno 1/2 světlo							
Vyleštěno							
	Chessboard LP 200 W LS 300 mm/s HD 110 μ m	Chessboard LP 200 W LS 200 mm/s HD 110 μ m	Chessboard LP 200 W LS 100 mm/s HD 110 μ m	Chessboard LP 200 W LS 80 mm/s HD 110 μ m	Chessboard LP 300 W LS 300 mm/s HD 110 μ m	Chessboard LP 300 W LS 200 mm/s HD 110 μ m	Chessboard LP 300 W LS 100 mm/s HD 110 μ m

8					Meandr 79° LP 200 W LS 300 mm/s HD 110 µm
					Meandr 79° LP 200 W LS 200 mm/s HD 110 µm
					Meandr 79° LP 200 W LS 100 mm/s HD 110 µm
					Meandr 79° LP 400 W LS 1400 mm/s HD 60 µm
12					Meandr 79° LP 400 W LS 1300 mm/s HD 60 µm
13					Chessboard LP 400 W LS 1400 mm/s HD 60 µm
14					Chessboard LP 400 W LS 1300 mm/s HD 60 µm

Příloha 9 Protokol z tahové zkoušky



Zapletal- Pantilejev, 8x40mm, Al slit, tyč extrud tyč 63 mm, F a T6.zs2

Page 1/1